

30-0377/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU

DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE BRAUNSCHWEIG

DIREKTOR: o. PROF. DR.-ING. KARL KORDINA



B e r i c h t

über das Tragverhalten einer Stahlbeton-Tonnenschale  
mit bauwerksnahen Abmessungen

*von*  
*Elm / Koll*

*H.*

*Januar 1967*

00

30-0377/001

*Peter*

Postsendungen:  
33 Braunschweig, Beethovenstraße 52

Fernsprecher: 478 2281  
Ortskennzahl 0531

Telegrammadresse: MPA Braunschweig

Besuchzeiten:  
Montag bis Freitag 8-16 Uhr

## Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung
2. Aufgabe und Zielsetzung der Untersuchung
3. Beschreibung und Abmessungen des Versuchskörpers
4. Versuchsaufbau und -einrichtung
5. Versuchsdurchführung
6. Versuchsauswertung
7. Kriterien für das Tragverhalten und die Traglast der Schale
8. Anlagen

### 1. Zusammenfassung

Es wird über einen Versuch an einer Stahlbeton-Tonnenschale mit bauwerksnahen Abmessungen berichtet. Der Schalenträger wurde bis zum Bruchzustand geprüft. Im einzelnen werden der Versuchsaufbau sowie die Versuchsdurchführung beschrieben. Die Meßergebnisse werden erläutert. An Hand der Meßwerte und Vergleichsrechnungen zeigt sich, daß das Tragverhalten der Schale mit ausreichender Genauigkeit durch die Balkenanalgie erklärt werden kann. Die geprüfte Schale besaß eine überraschend hohe Bruchsicherheit, die insbesondere auf konstruktiv bedingte, aber statisch nicht erforderliche Montagebewehrungen zurückzuführen ist.

### 2. Aufgabe und Zielsetzung der Untersuchung

Gegenstand des vorliegenden Untersuchungsberichtes ist das Tragverhalten einer im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig hergestellten und geprüften Stahlbeton-Tonnenschale mit bauwerksnahen Abmessungen. Hierbei wurde der Versuchskörper bis zum Bruch gebracht.

Die Anregung zu diesem Großversuch ging von bereits früher durchgeführten Untersuchungen an Modell-Tonnenschalen aus (Modell-Werkstoff Plexiglas und Asbestzement; Modell-Maßstab 1 : 40). Der Versuch sollte nicht nur die Ergebnisse der Modellversuche mit denen eines Großversuches vergleichen, sondern auch das Tragverhalten einer nach der Elastizitätstheorie für Gebrauchslast bemessenen Stahlbeton-Tonnenschale bis zum Bruchzustand überprüfen. Hierbei waren insbesondere Beanspruchungen über den elastischen Bereich hinaus von großem Interesse, da bislang Beanspruchungen oberhalb der Elastizitätsgrenze rechnerisch nicht exakt erfaßt werden können. Die gebräuchlichen Berechnungsmethoden der Schalentheorie setzen elastisches Verhalten der Baustoffe voraus.

Der vorliegende Großversuch ist als Einzelversuch zu werten, eine Verallgemeinerung ist wegen der lediglich an einem Versuch gewonnenen Ergebnisse nur beschränkt möglich. Insgesamt konnten aber wertvolle Erfahrungen für Planung, Durchführung und Auswertung derartiger Großversuche gemacht werden. Eine Weiterführung solcher Untersuchungen an Großbauteilen wäre wünschenswert.

### 3. Beschreibung der Abmessungen und des Versuchskörpers

Die Abmessungen der Versuchsschale wurden nach baupraktischen Erfordernissen und den versuchstechnischen Möglichkeiten, wie sie im Institut gegeben sind, festgelegt.

Die insgesamt rd. 9,00 m lange,  $\approx 4,50$  m breite und (einschl. Randträger)  $\approx 1,17$  m hohe Kreiszyinderschale setzt sich aus folgenden Elementen zusammen:

- a) aus dem 5 cm dicken Schalensegment mit 81,5 cm Stichhöhe;
- b) aus den beiden im Mittel 13 cm dicken und 35 cm hohen Randträgern;
- c) aus den beiden im Mittel 13 cm dicken und max.  $\approx 117$  cm hohen Binderscheiben.

Vergleiche hierzu Anlage 1 und Bild I und II.

Das Schalensegment wurde mit Baustahlgewebematten doppelt bewehrt. Für die innere und äußere Bewehrungslage wurden Listenmatten St IV<sub>b</sub> (gerippt) verwendet. Auch die Binderscheiben wurden mit Baustahlgewebe bewehrt. Als Tragbewehrung der Randträger und Binderscheiben sowie als Anschluß- und Bügelbewehrung für Randträger und Binderscheiben wurde Rippenstahl St III<sub>b</sub> eingebaut. Die Betongüte der Versuchsschale entsprach einem Beton B 300.

Die Bemessung der Versuchsschale erfolgte für den Gebrauchszustand, wobei sich aus Eigengewicht + Isolierung + Dachhaut + Schnee + Zuschlag für Wind eine gleichmäßig verteilte Last von rd.  $0,275 \text{ t/m}^2$  ergab.

Die Stahlzugspannungen wurden mit  $\sigma_e \leq 1600 \text{ kp/cm}^2$  zwecks Erhöhung der Rissicherheit begrenzt.

Die Schalenbewehrung ist in der Anlage 2 im einzelnen dargestellt.

#### 4. Versuchsaufbau und -einrichtung

Die auf der Prüffelddecke hergestellte Versuchsschale wurde nach dem Ausrüsten mit Hilfe eines Kranes auf die Auflager gehoben (vergl. Anlage 3 und Bild I). Darauf wurden die Meßeinrichtungen für die Durchbiegungsmessungen am gesamten Tragwerk und Dehnungsmessungen an charakteristischen Stellen der Bewehrungsstäbe und des Betons aufgebaut. Für die Durchbiegungsmessungen wurden mechanische Meßuhren mit 1/100 mm Meßgenauigkeit sowie Rollengeräte (1/10 mm Meßgenauigkeit) verwendet. Dehnungsmessungen erfolgten mittels Setzdehnungsmesser und elektrischen Dehnungsmeßstreifen. (Soweit letztere an Bewehrungsstäben befestigt waren, ist ihr Einbau vor dem Betonieren erfolgt).

Es wurden folgende Messungen durchgeführt:



1. Durchbiegungs- und Verformungsmessungen am gesamten Tragwerk;
  - 1.1 Lotrechte Durchbiegung der Randbalken und des Schalensegmentes;
  - 1.2 Verdrehung der Randbalken und der Binderscheiben;
  - 1.3 Verschiebung der Auflager;
  - 1.4 Horizontale Verschiebung der Randträger senkrecht zur Schalenachse.
2. Dehnungsmessungen;
  - 2.1 Dehnungsmessungen (mittels Setzdehnungsmesser) in Trägermitte und Viertelpunkten an Bewehrungslängsstäben und dem Beton der Randträger;
  - 2.2 Dehnungsmessungen (mittels Setzdehnungsmesser) auf der Oberseite des Schalensegmentes;
  - 2.3 Dehnungsmessungen (mittels Dehnungsmeßstreifen) an Bewehrungslängsstäben der Randträger in Trägermitte und auf der Ober- und Unterseite des Betons am Schalensegment.

In den Anlagen 4 und 5 sind die unter 1 und 2 genannten Meßeinrichtungen dargestellt.

3. Messung und Aufzeichnung der Rißbilder;

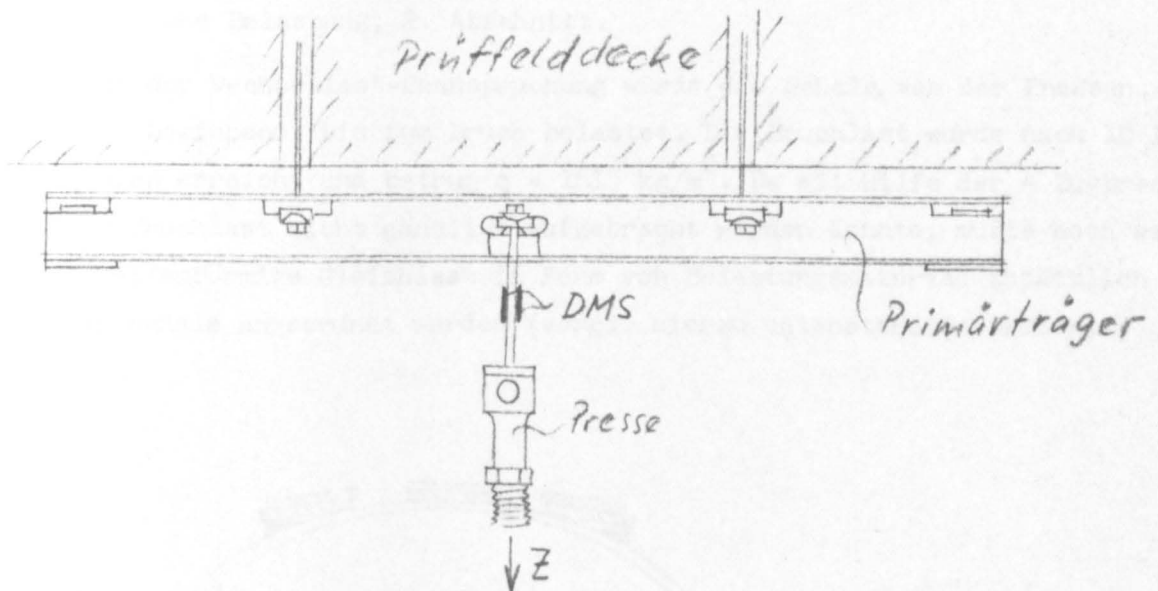
Die Belastungseinrichtung wurde in der Weise angeordnet, daß die Prüflast mittels ölhydraulischer Zugpressen, die unterhalb der Prüffelddecke aufgestellt waren, über Waagebalken annähernd gleichmäßig verteilt auf das Schalensegment aufgebracht werden konnte. Die Zugpressen ermöglichten jede gewünschte Steigerung und Konstanthaltung der Last in allen Beanspruchungsbereichen bis zum Bruch sowie die Eintragung von Wechselastbeanspruchungen. Insgesamt wurden 4 Zugpressen mit je 12,0 t max. Zugkraft vorgesehen. Für die weitere Lastverteilung auf dem Schalensegment sorgten die unter der Schale aufgehängten Lastverteilungsträger, die mittels Zugstangen miteinander verbunden waren (vergl. Bild II, VII und VIII). Die Kraft der Zugpressen wurde an einen Primär-Träger abgegeben, der unterhalb der Prüffelddecke angeordnet wurde (vergl. Bild III). Über Zugstangen wurden schließlich die Lasten von den Sekundärträgern in die Lasteintragungspunkte auf dem Schalensegment eingeleitet (vergl. Bild I).

Aus Anlage 6 und 7 sind die konstruktiven Details der Lasteintragung und Lastverteilung zu sehen.

### 5. Versuchsdurchführung

Nach dem Aufbau der Meßeinrichtungen wurde zunächst für den Lastfall Eigengewicht eine Nullmessung durchgeführt und darauf die gesamte Belastungseinrichtung montiert. Das Gewicht der Belastungseinrichtung einschl. Schalengewicht entsprach dem Lastzustand aus rechnerischen Gebrauchslasten.

Nach einer zweiten Nullmessung für den Gebrauchslastfall wurde die Belastung mittels Pressen stufenweise gesteigert. Zur Kontrolle der Pressenkräfte waren an den Zugstangen zwischen Pressen- und Primärträgern Dehnungsmeßstreifen angeschlossen (vergl. Skizze).



Die Messungen erfolgten jeweils 10 Min. nach Aufbringen einer neuen Laststufe, um zeitabhängige Verformungen möglichst abklingen zu lassen.

Die Schale wurde statisch und unter Schwellast geprüft. Die Untersuchung durch eine Schwellastbeanspruchung knapp oberhalb der Gebrauchslast erfolgte mit dem Ziel, Rißbildung und mögliche Kräfteumlagerungen, z.B. durch Störung des Verbundes u. dergl., deutlicher sichtbar zu machen. Bei rein statischen Lastversuchen treten diese Effekte in der Regel erst bei vergleichsweise höheren Beanspruchungen deutlich auf.

#### 1. Statische Belastung, 1. Abschnitt.

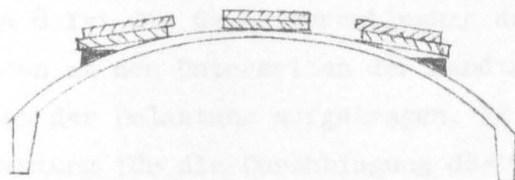
Die hydraulisch aufgebrachten Laststufen entsprachen einer gleichmäßig verteilten Flächenlast von je  $0,063 \text{ t/m}^2$ . Die Schale wurde in 5 Stufen von Null bis max.  $1,535 \text{ t/m}^2$  belastet. Zwischen den einzelnen Laststufen wurden Messungen vorgenommen.

## 2. Wechsellastbeanspruchung.

Nach diesem 1. Abschnitt der statischen Belastung wurde die Versuchsschale mittels eines Pulsators einer Wechsellastbeanspruchung unterworfen. Es konnten je 60 Lastwechsel pro Min. bei einer Unterlast von  $0,063 \text{ t/m}^2$  und einer Oberlast von  $1,219 \text{ t/m}^2$  gefahren werden. Insgesamt wurde mit gewissen Veränderungen von Ober- und Unterlast über eine Dauer von  $3 \frac{1}{2}$  Std. die Lastwechselbeanspruchung aufgebracht. Die Lastwechselzahl betrug 60 LW/min. Hierbei konnten Rißbildungen nach Ausbreitung und Rißbreite näher studiert werden.

## 3. Statische Belastung, 2. Abschnitt.

Nach der Wechsellast-Beanspruchung wurde die Schale, von der Pressenlast Null beginnend, bis zum Bruch belastet. Die Bruchlast wurde nach 10 Laststufen erreicht und betrug  $q = 1615 \text{ kg/m}^2$ . Da mit Hilfe der 4 Zugpressen die Bruchlast nicht gänzlich aufgebracht werden konnte, mußte noch eine streifenförmige Gleichlast in Form von Belastungsmaterial zusätzlich auf der Schale angeordnet werden (vergl. hierzu untenstehende Skizze).



Bei einer Belastung von  $1,535 \text{ t/m}^2$  wurde vorsorglich die Meßeinrichtung entfernt, um Beschädigungen zu vermeiden. Kurz vor Eintritt des Bruches konnten daher keine Messungen mehr vorgenommen werden. Das Tragverhalten wie die Schäden wurden lediglich beobachtet und registriert.

Die Schale im Bruchzustand zeigen die Bilder IV und V. Die auf der Schalenoberkante stark markierten Risse sind die im Laufe der Laststeigerungen aufgetretenen Rißbildungen, die mit Erreichen des Erschöpfungszustandes zunehmend ausgeprägter und breiter wurden. Die in den Bildern erkennbaren schwächer eingezeichneten Risse, die die ersten Rißbildungen mehr

oder weniger orthogonal durchsetzen, geben die zusätzlichen Rißbildungen, bedingt durch den Zusammenbruch der Schale, wieder. Das Versagen erfolgte im Mittelschnitt durch Fließen der Zugbewehrungen in den Randträgern und einem dadurch sekundär ausgelösten Bruch der Biegedruckzone im Schalenscheitel. Während des Zusammenbruches der Konstruktion trat eine Verflachung des Segmentes im mittleren Bereich ein; die aufgebrachten Lasten mußten gleichsam wie Kragarme von den Schalenseitenbereichen her getragen werden. Aus dieser Wirkung resultieren die beobachteten Rißbildungen.

#### 6. Versuchsauswertung

Die aus den Messungen gewonnenen Ergebnisse wurden ausgewertet und mit den Beanspruchungsgrößen aus einer Rechnung und mit Traglastkriterien für biegebeanspruchte balkenartige Bauteile verglichen.

Die Ergebnisse der Auswertungen sind in den Anlagen 8 bis 16 graphisch aufgetragen.

Der Auswertung wurden Mittelwerte aus den einzelnen Belastungsdurchgängen, die im unteren Lastbereich häufig wiederholt wurden, bis zum Erreichen der Maximallast zugrunde gelegt (vergl. Punkt 4).

Im Diagramm Anlage 8 ist die Gesamtdurchbiegung der Versuchsschale in der Tragwerksmitte, gemessen an den Unterseiten der Randträger sowie im Scheitelpunkt, in Abhängigkeit von der Belastung aufgetragen. Im gleichen Diagramm ist eine rechnerische Auswertung für die Durchbiegung des Tragwerkes nach der Balkenanalogie aufgetragen. Wie später gezeigt wird, kann das Tragverhalten der Schale ausreichend genau mit Hilfe der Balkenanalogie (vergl. Lundgreen [1]) gedeutet werden. Unter dieser Annahme wurde mit Berücksichtigung einer Verringerung der Biegesteifigkeit der gerissenen Schale (Zustand II) die Verformung des Tragwerkes nachgerechnet. Im Diagramm Anlage 9 ist die relative Verschiebung zwischen Scheitel und Randträger in Abhängigkeit von der Belastung aufgetragen. Die Durchbiegungen nehmen erwartungsgemäß nach Auftreten des Spannungszustandes II stärker zu. Im Bereich  $q = 1,2$  bis  $1,4 \text{ t/m}^2$  wird eine kurzfristige Verringerung der Durchbiegungszunahme beobachtet. Dieser Effekt wurde auch bei kleineren Versuchsschalen festgestellt, konnte jedoch noch nicht ausreichend erklärt werden.

Im Diagramm Anlage 10 ist die Abnahme der Biegesteifigkeit des Schalenträgers, untersucht für den Mittelschnitt, bei zunehmender Belastung ausgewertet. Der Nachrechnung liegt ebenfalls die Balkenanalogie zugrunde. Beim Übergang von Zu-

stand I zu Zustand II tritt eine deutliche Steifigkeitsverminderung ein; bis zum Versagen des Tragwerkes ist ein weiterer allmählicher Abfall infolge stärkerer Rißbildungen und Verringerung des E-Moduls zu beobachten. In einer parallelen Untersuchung wurden Arbeitslinien von Vergleichsproben, die aus dem Schalen-Beton angefertigt wurden, bestimmt.

In Diagramm Anlage 11 ist die seitliche Verschiebung des Schalensegmentes infolge seiner Verflachung dargestellt. Das Diagramm in Anlage 12 zeigt die Verdrehung der Randträger in Abhängigkeit von der Belastung.

Das Last-Dehnungsdiagramm nach Anlage 13 zeigt die Beanspruchung des Betons im Schalenscheitel (Mittelschnitt) bis zum Versagen des Tragwerkes. Ebenfalls ist die Beanspruchung der Zugbewehrung in den Randträgern für die Schalenmitte aufgetragen.

Die Diagramme in den Anlagen 14 und 15 zeigen den Verlauf der  $M_{\varphi}$  - und  $N_{\varphi}$  -Kräfte (in Ringrichtung) für die Schalenmitte. Diese Schnittkräfte wurden durch Auswertungen von Dehnungsmessungen (Oberflächenmeßstellen am Beton) gewonnen. Die Meßergebnisse sind allerdings nicht für alle Beanspruchungsbereiche als zuverlässig zu betrachten: Bereits im unteren Beanspruchungsbereich traten Rißbildungen auf, die, wenn sie in unmittelbarer Nähe des Dehnungsmeßstreifens liegen, die Meßergebnisse verfälschen können. Die ausgewerteten Schnittgrößen sind daher als nicht ganz gesichert anzusehen. In den Diagrammen 14 und 15 sind ebenfalls die Schnittgrößen nach der Elastizitätstheorie für den Gebrauchszustand eingetragen.

#### 7. Kriterien für das Tragverhalten und die Traglast der Schale

Die Versuchsauswertungen unter Punkt 5 zeigten, daß mit Anwendung der Balken-analogie auf den Schalenträger die Meßergebnisse ausreichend genau gedeutet werden können. Die Schale verhält sich wie ein hoher balkenartiger Träger, wobei ein mehr oder weniger großer Scheitelbereich des Schalensegmentes den Druckbereich, die Randträger mit der Zugbewehrung, den Zugbereich des Balkens bilden.

Über die Dehnungsmessungen am Bewehrungsstahl der Randträger sowie am Beton im Scheitelbereich in einer zur Erzeugenden parallelen Richtung konnten jeweils der Verformungs- und Spannungszustand in Schalenmitte gefunden werden. Hierdurch war es möglich, ein inneres Moment auszuwerten, das dem aus äußeren Lasten resultierenden äußeren Moment gegenübergestellt wurde. Ein Vergleich von innerem und äußerem Moment zeigte für alle Beanspruchungsbereiche ausreichende Übereinstimmungen.



Die Schale weist eine Bruchsicherheit von  $\approx 5,7$  auf, die verhältnismäßig groß ist. Die unerwartet hohe Bruchlast des Tragwerkes war Gegenstand näherer rechnerischer Überprüfungen. Hierfür wurde ebenfalls die Balkenanalogie zugrunde gelegt. Die Aufnahme eines Bruchmomentes in Größe des äußeren Momentes konnte bestätigt werden. Tatsächlich wurden neben der für den Gebrauchszustand statisch erforderlichen Zugbewehrung in den Randträgern konstruktiv bedingte Montageeisen im Randträger und im Anschnitt der Schale verlegt sowie im Schalensegment eine Mattenbewehrung vorgesehen, die auch in Richtung der Erzeugenden Querstäbe besitzt, welche wiederum anteilig die Biegezugbewehrung erhöhen. Unter Berücksichtigung aller zusätzlichen Bewehrungen sowie der für die Bemessung zugrunde gelegten herabgesetzten Stahlspannungen ergab sich in genauen Nachrechnungen die genannte Bruchsicherheit. Für einen üblich bemessenen balkenartigen Biegeträger ist demgegenüber eine Bruchsicherheit von  $\gamma = 1,75$  einzuhalten.

Die Schale kann als Biegeträger mit einem verhältnismäßig großen Hebelarm der inneren Kräfte betrachtet werden; daher können verhältnismäßig geringe absolute Erhöhungen des Bewehrungsquerschnittes infolge Montageeisen u. dergl. das Bruchmoment stark erhöhen. Die vorliegende Bewehrungsführung und -anordnung ist bei Schalenträgwerken dieses Typs häufig gegeben, weil konstruktiv bedingt.

In der Anlage 16 ist im einzelnen ein Bruchsicherheitsnachweis unter Berücksichtigung aller vorhandenen Bewehrungen angegeben. Hierfür wurde eine Arbeitslinie des Betons nach Versuchen mit Probekörpern des Schalen-Betons zugrunde gelegt; der E-Modul des Stahles wurde - wie üblich - mit  $2,1 \times 10^6 \text{ kp/cm}^2$  angenommen.

Das entscheidende Kriterium für das Versagen dieses Schalenträgers ist das Erreichen der Bruchlast analog zu einem Biegeträger. Die Schale ist mit einem Verhältnis der Grundrißabmessungen von 1 : 2 als lange Schale zu betrachten, auf die für eine Bemessung mit Ausnahme des Quermomentes die Balkenanalogie anzuwenden ist. Die Wirkungen aus dem Quermoment beeinträchtigen das Tragverhalten dieser Schale kaum. Ebenfalls besteht für das Schalensegment wegen seines verhältnismäßig hohen Stiches keine Gefahr für ein vorzeitiges Versagen aus Stabilitätsgründen. Die ausgenutzten Druckspannungen im Scheitelbereich sind verhältnismäßig gering. Infolge der starken Krümmung der Schale war bis unmittelbar vor Eintreten des Bruches auch kein vorzeitiges Verflachen der Schalenfläche zu beobachten.

[1] H. Lundgreen, Cylindrical Shells, Volume 1, Cylindrical Roofs, The Danish Technical Press, Copenhagen 1960

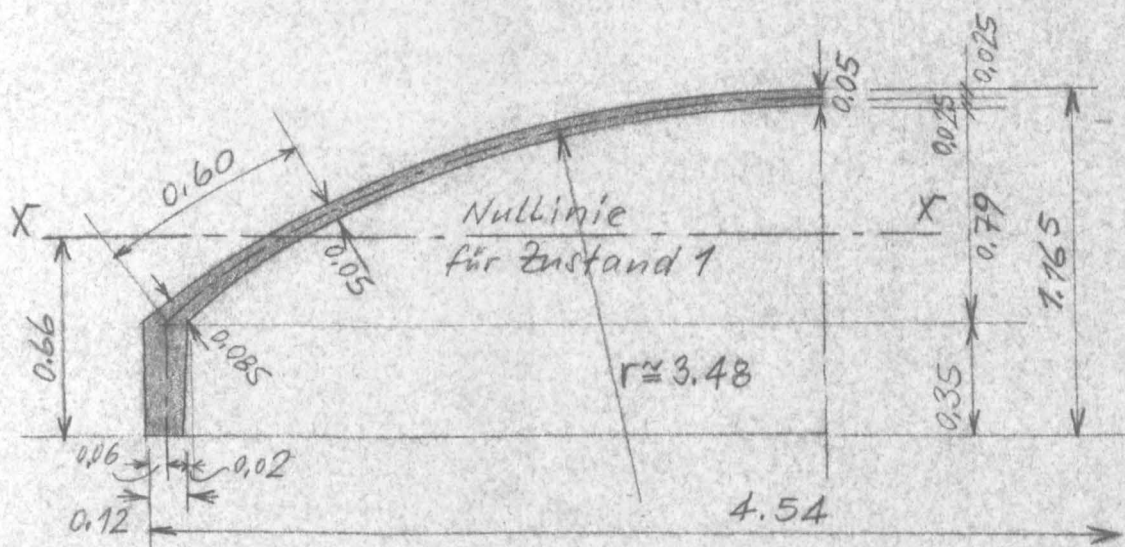
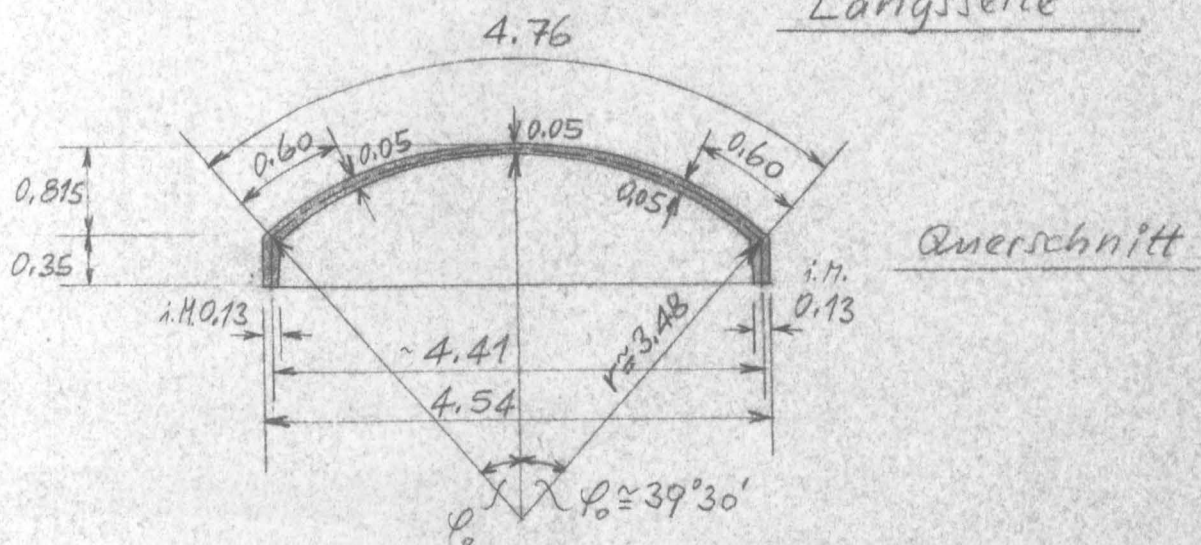
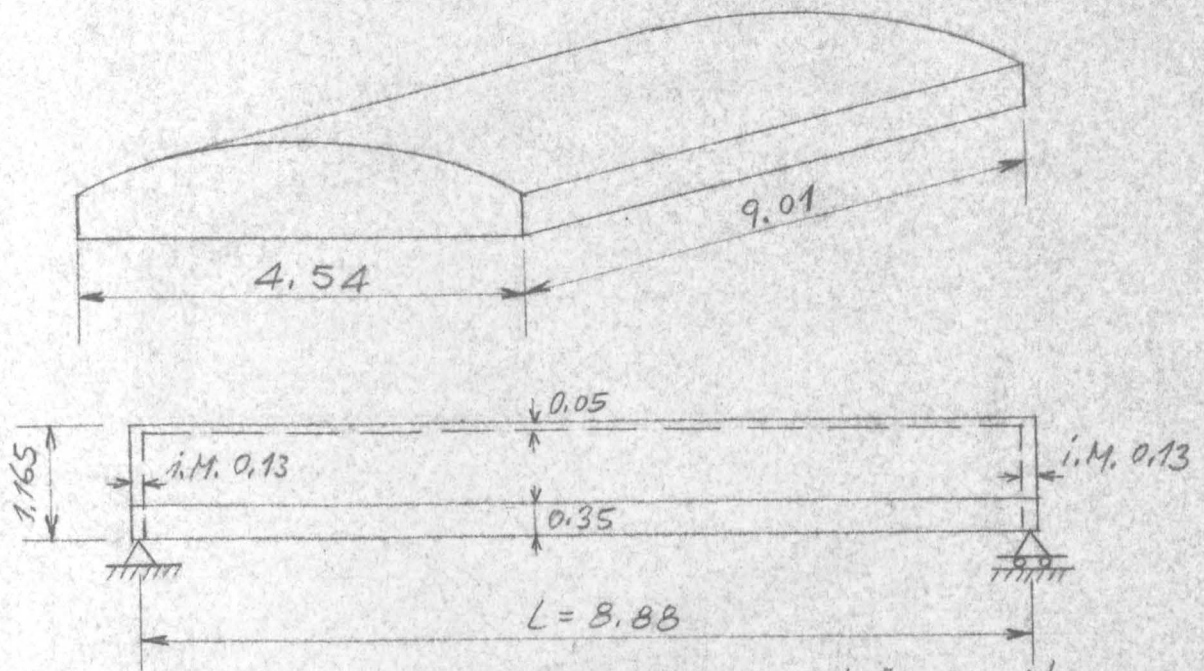


## 9. Anlagen

Anlage	1	Abmessungen der Versuchsschale
"	2	Schalenbewehrung
"	3	Lagerung und Auflagerausbildung der Schale
"	4	Meßstellen für Verformungsmessungen
"	5	Meßstellen für Dehnungsmessungen
"	6	Belastungseinrichtung
"	7	Belastungseinrichtung
"	8	Belastungs-Durchbiegungs-Diagramm (Messungen)
"	9	Belastungs-Durchbiegungs-Diagramm (Messung - Rechnung)
"	10	Verflachung des Schalensegmentes
"	11	Änderung der Biegesteifigkeit der Schale
"	12	Randträgerverschreibung
"	13	Randträgerverdrehung
"	14	Last-Dehnungs-Diagramm für Scheitelbeton u. Zugbewehrung Randträger
"	15	$M_{\varphi}$ -Diagramm
"	16	$N_{\varphi}$ -Diagramm
"	17	N-freie Schnittkraftermittlung für Lastzustand aus max. Pressenkraft
"	18	Übersicht über Belastung der Schale

## Bilder

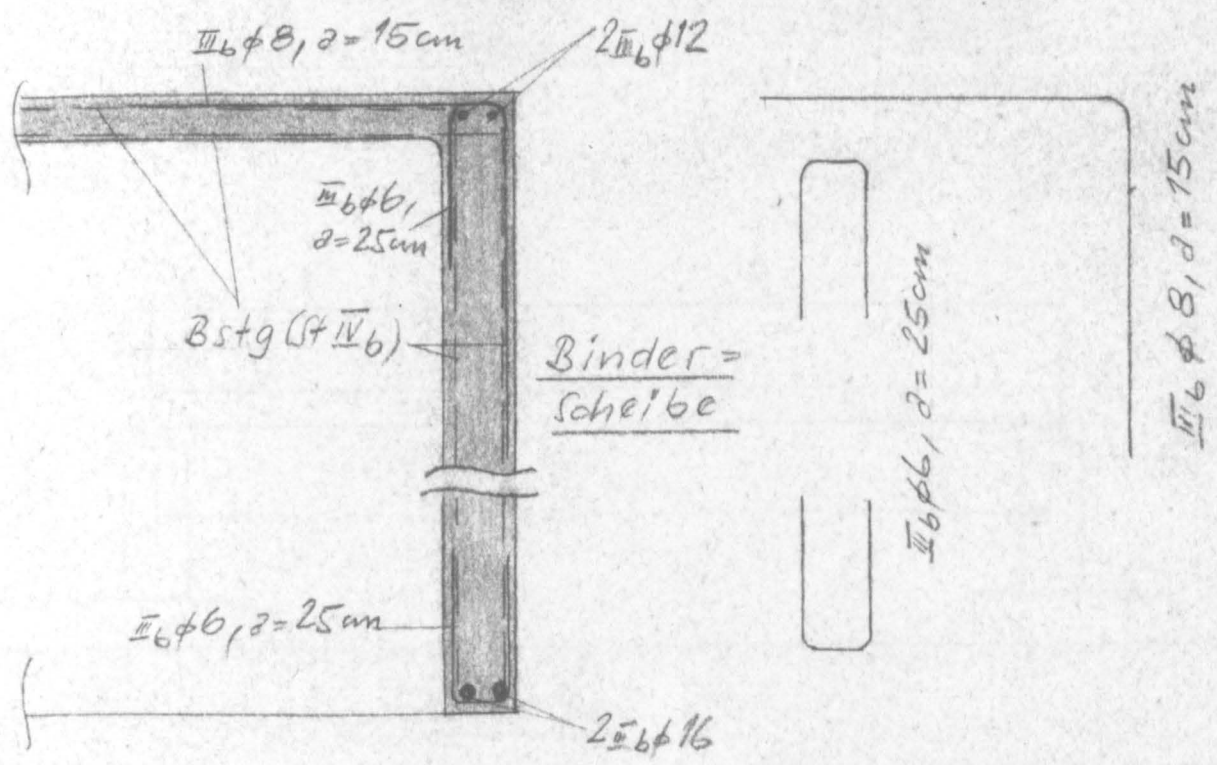
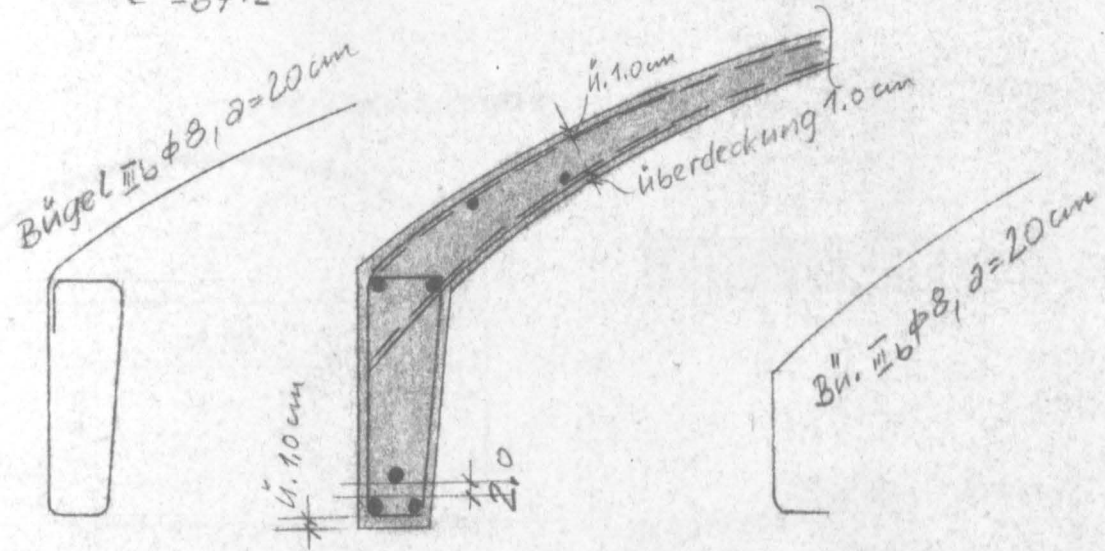
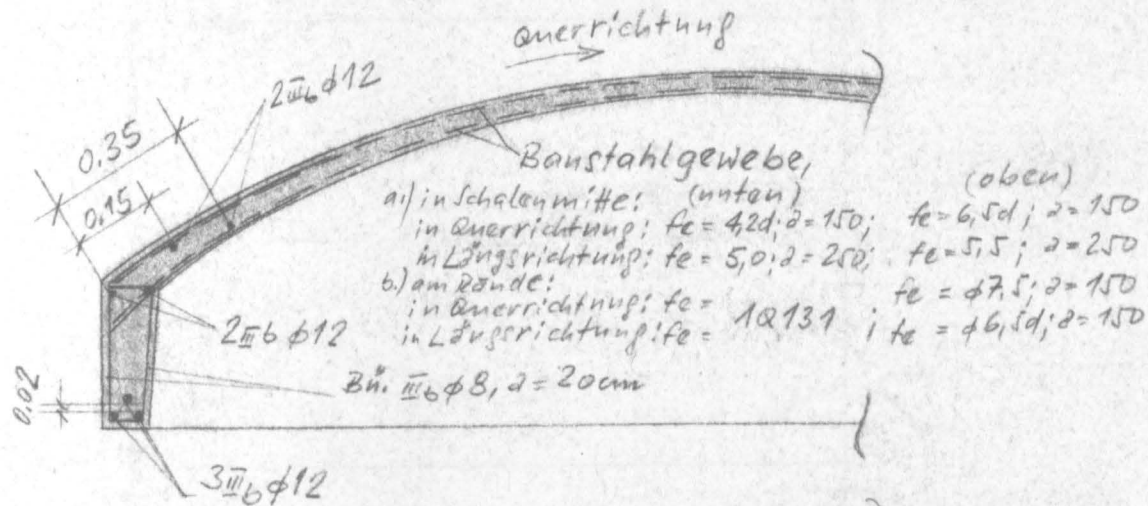
I	Ansicht der Gesamtschale; Versuchsaufbau
II	Schale; Lastverteilung oberhalb der Prüffelddecke
III	Anordnung der Zugpressen unterhalb der Prüffelddecke; Primär-Lastverteiler
IV	Schale im Bruchzustand
V	Schale im Bruchzustand; Bruchbereich im Mittelschnitt
VI ) und ) VII )	Rißbildungen an der Schaleninnenseite; Lastverteilung oberhalb der Prüffelddecke



Abmessungen der Versuchsschale

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

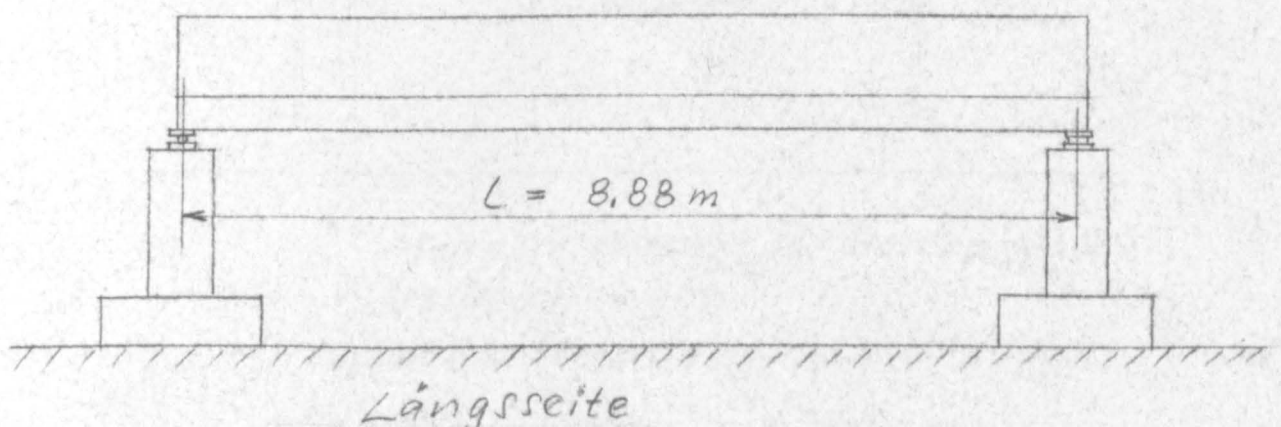
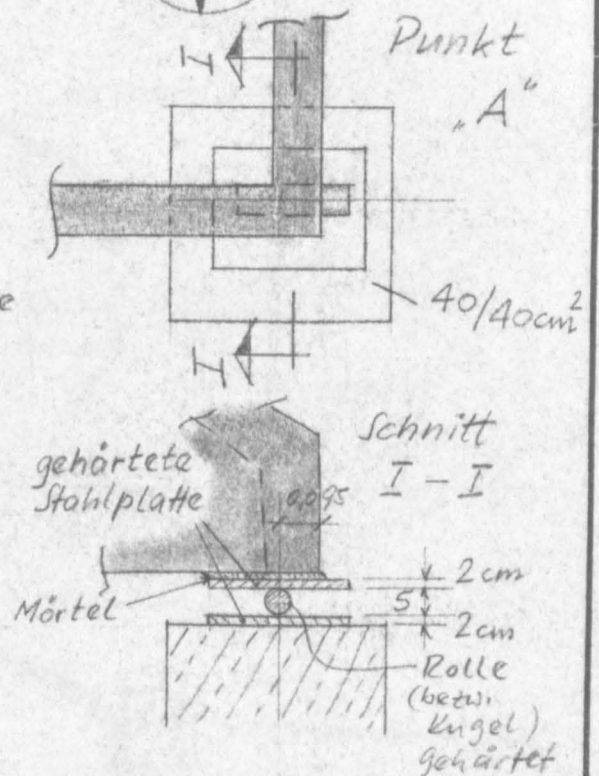
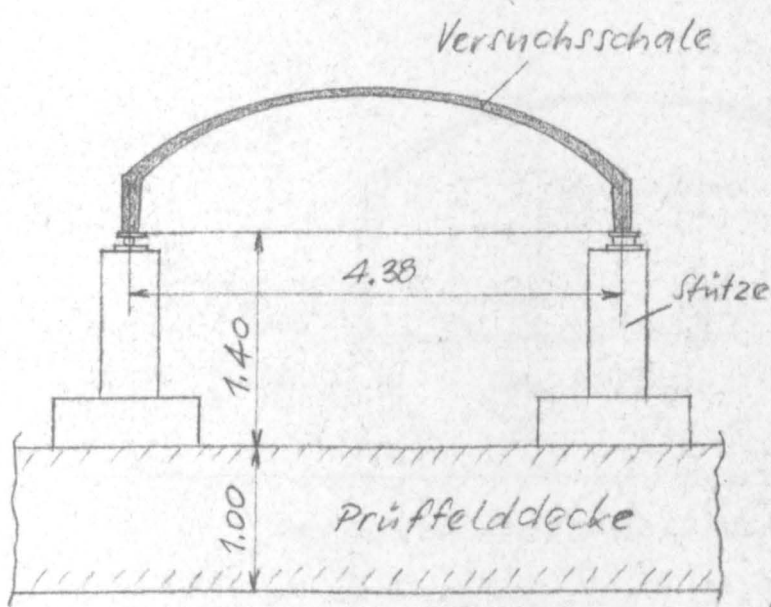
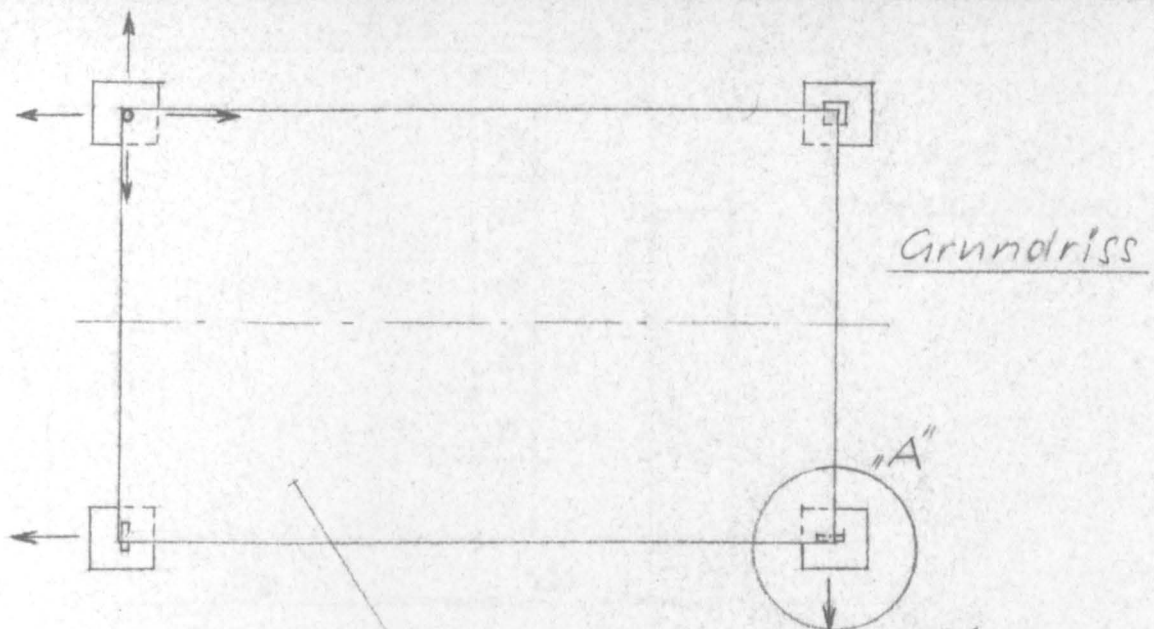
Anlage 1



# Schalenbewehrung

Anlage 2

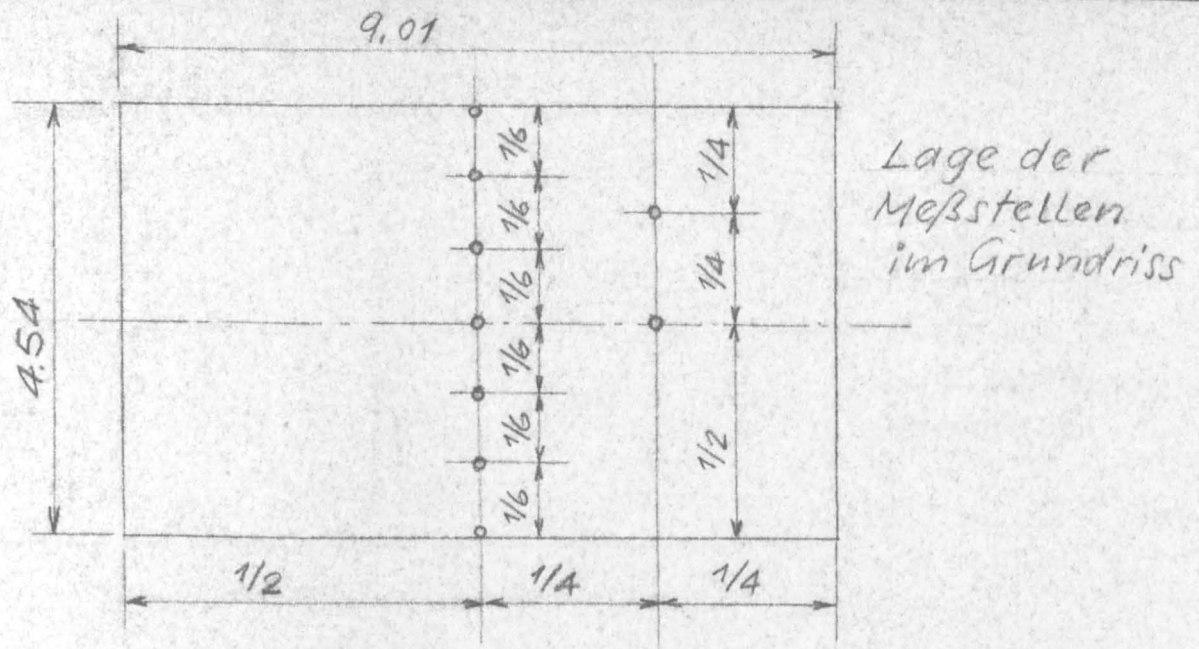




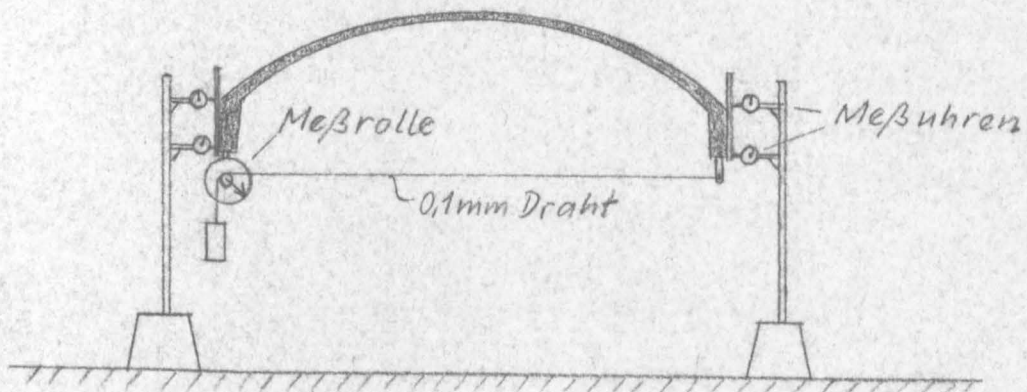
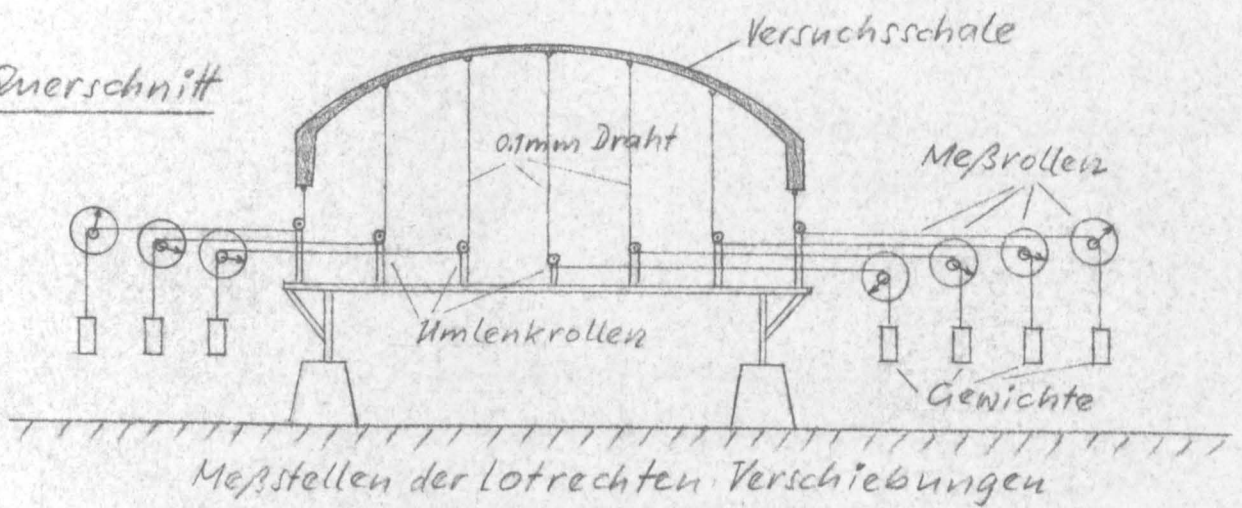
Lagerung und Auflagerausbildung

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 3



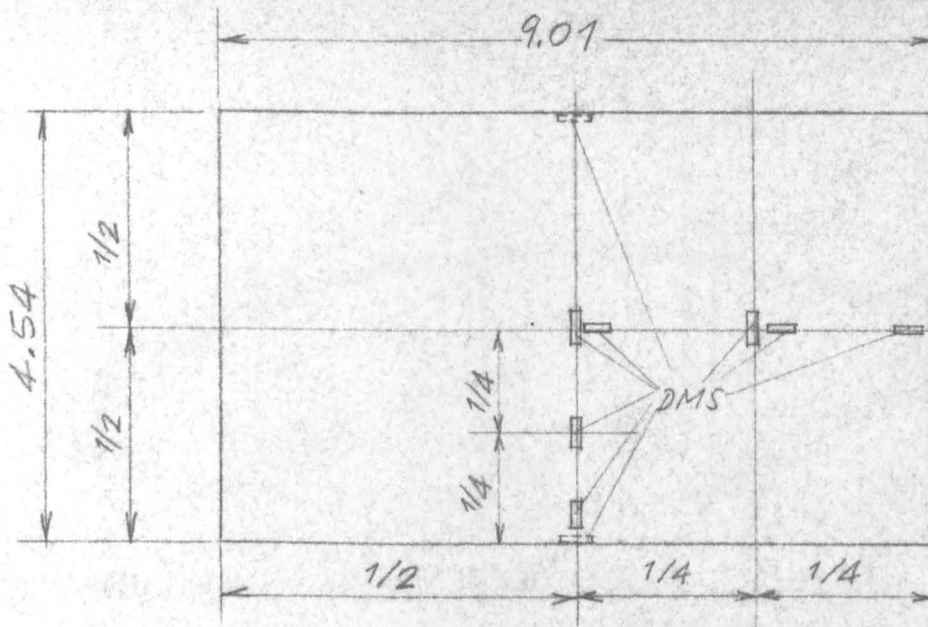
### Querschnitt



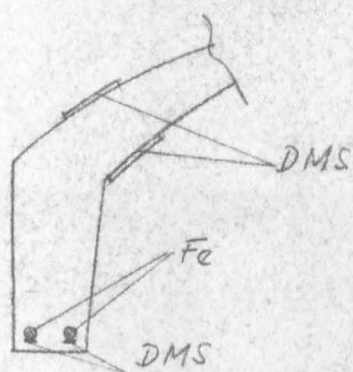
Lage und Anordnung der Meßstellen für die Verformungsmessungen

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

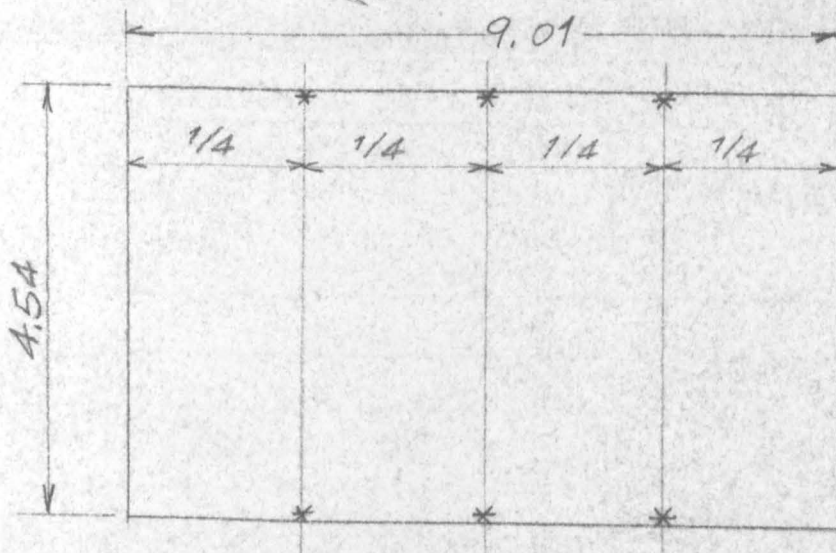
Anlage 4



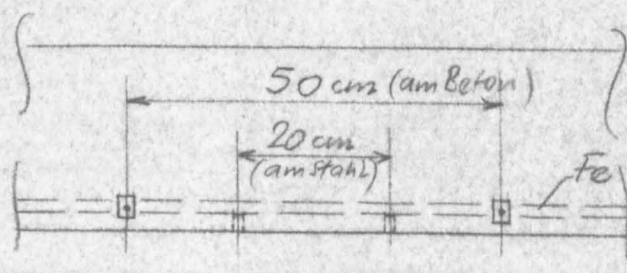
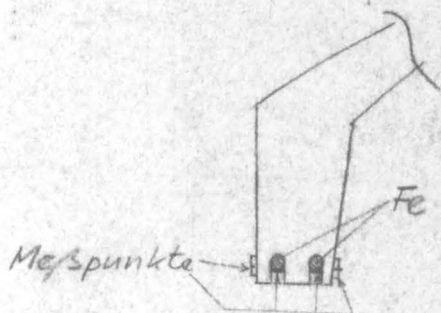
Lage der Meßstellen für die elektrische Dehnungsmessung.



Randbalken-Querschnitt mit Dehnungsmeßstreifen



Lage der Meßstellen für die Dehnungsmessungen mittels Setzdehnungsmesser

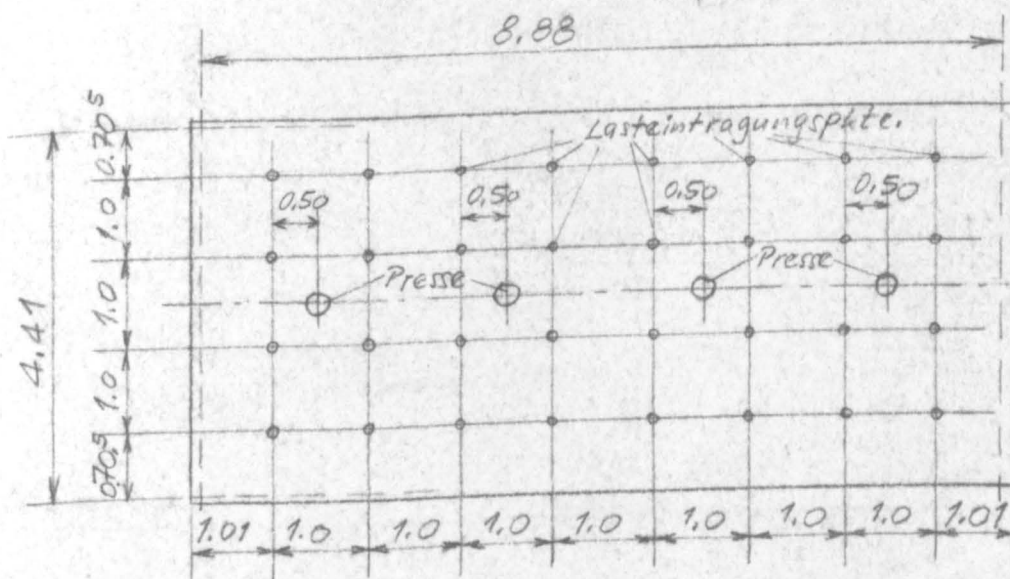
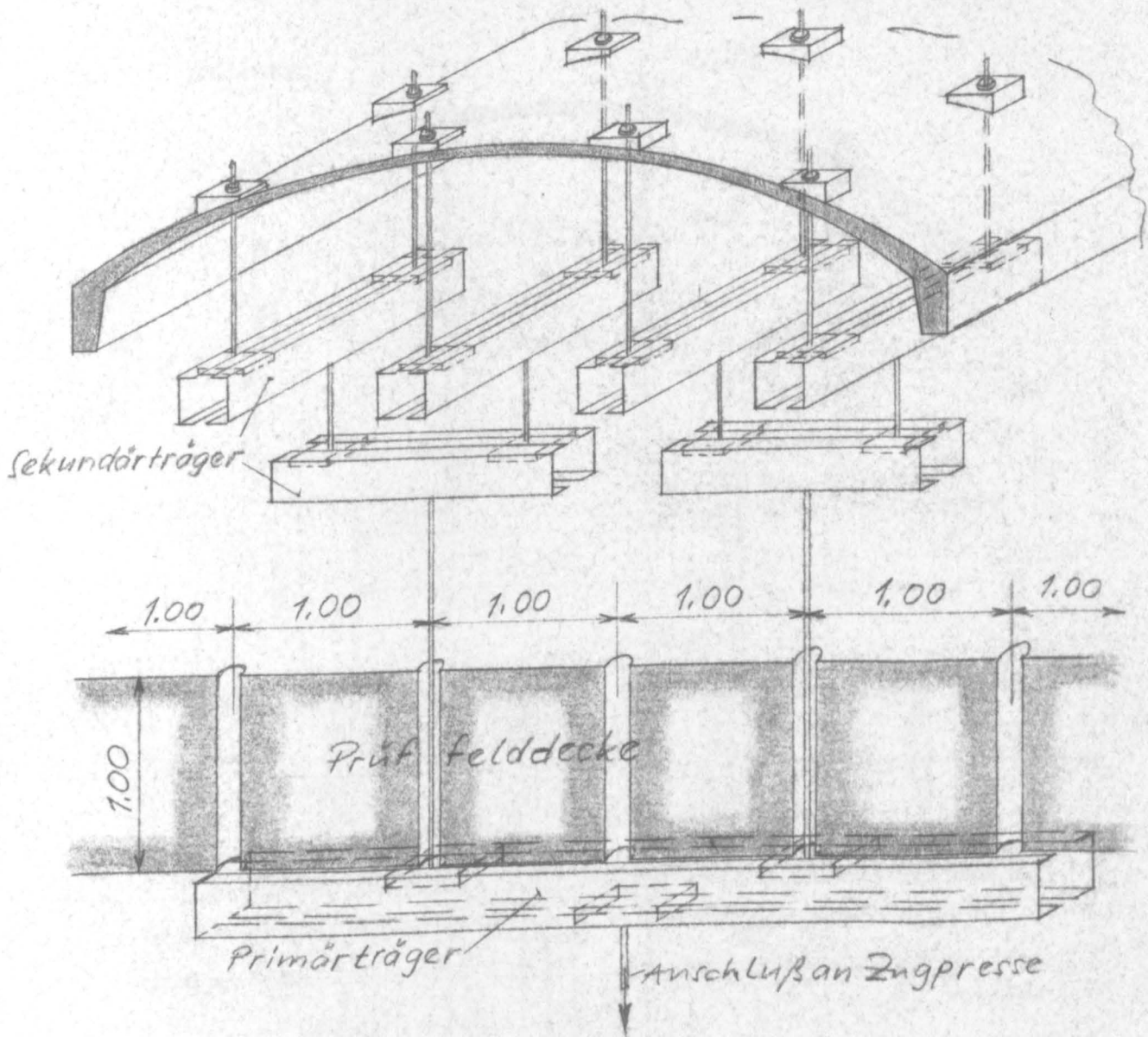


Meßstellen für die Dehnungsmessungen

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 5

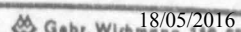




Belastungseinrichtung

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 6





q/Gebrachslast

# Belastungs-Durchbiegungs-Diagramm der Gesamtschale

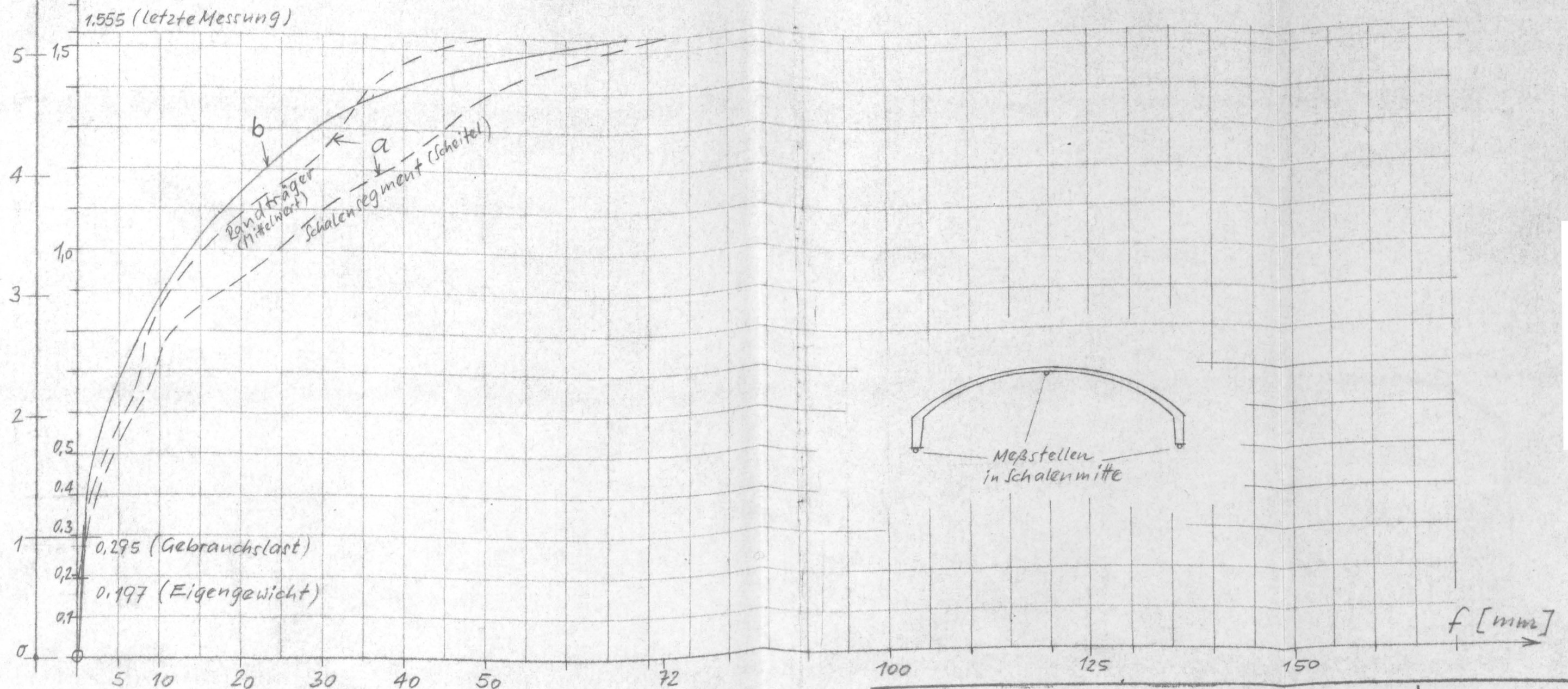
a.) gemessene Werte

b.) rechnerische Werte nach Balkenanalogie:

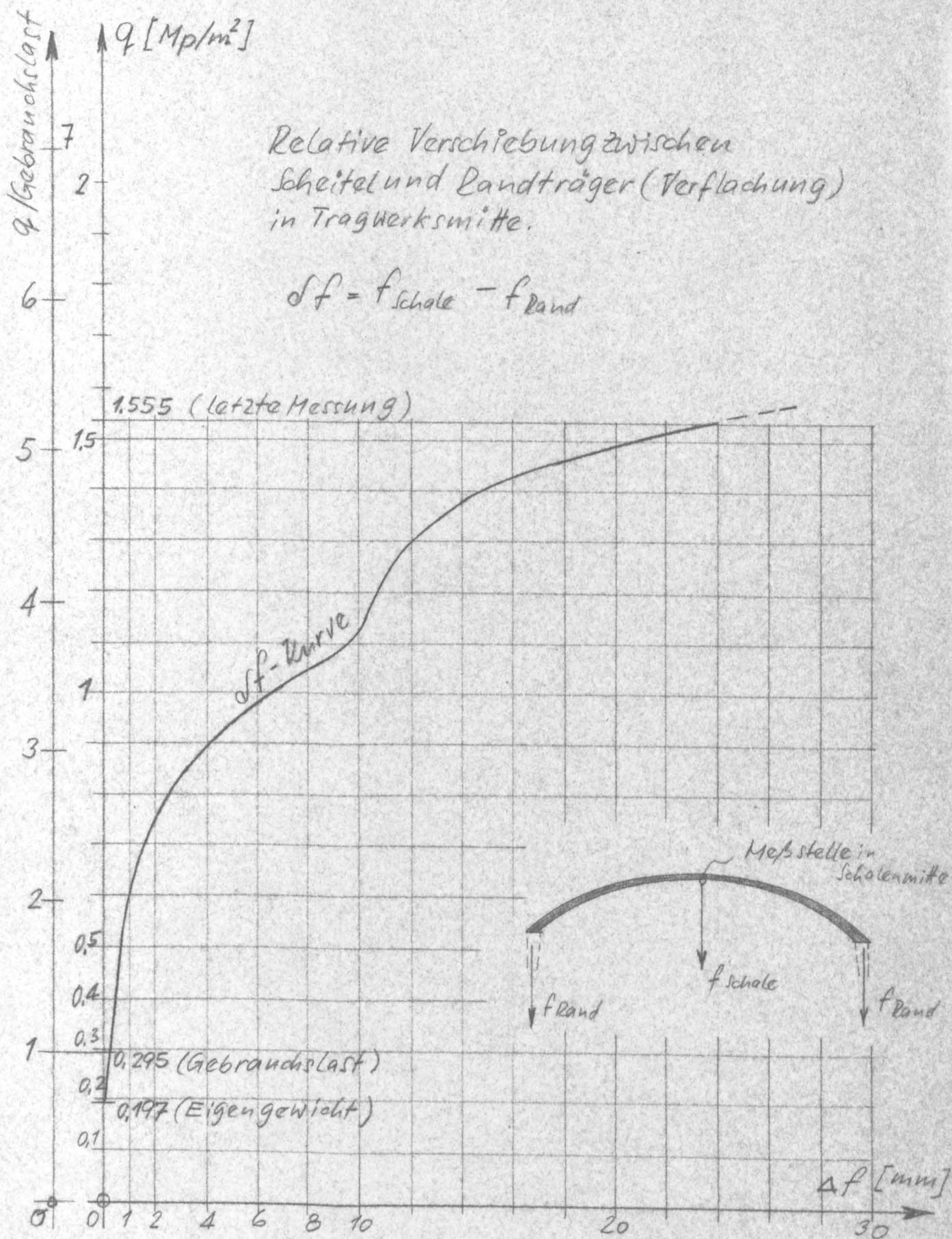
$$E_0 \cdot J_0 \cdot \delta_i = \int M \bar{M} \cdot \frac{E \cdot J}{E_0 \cdot J_0} ds ;$$

$E_0 \cdot J_0$  = Ausgangswert für unverformten Querschnitt

$E \cdot J$  = effektive Werte nach Meßergebnissen

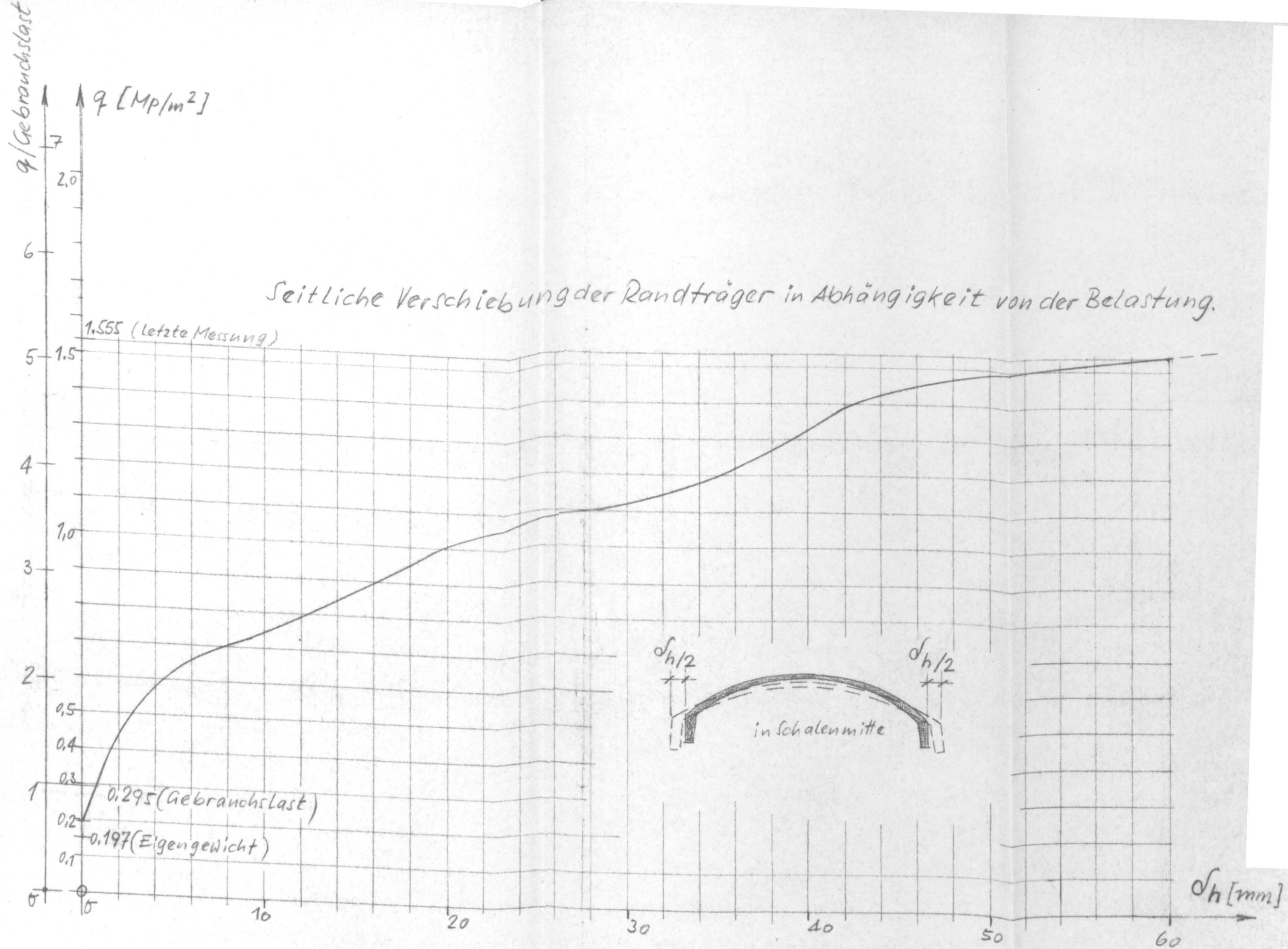






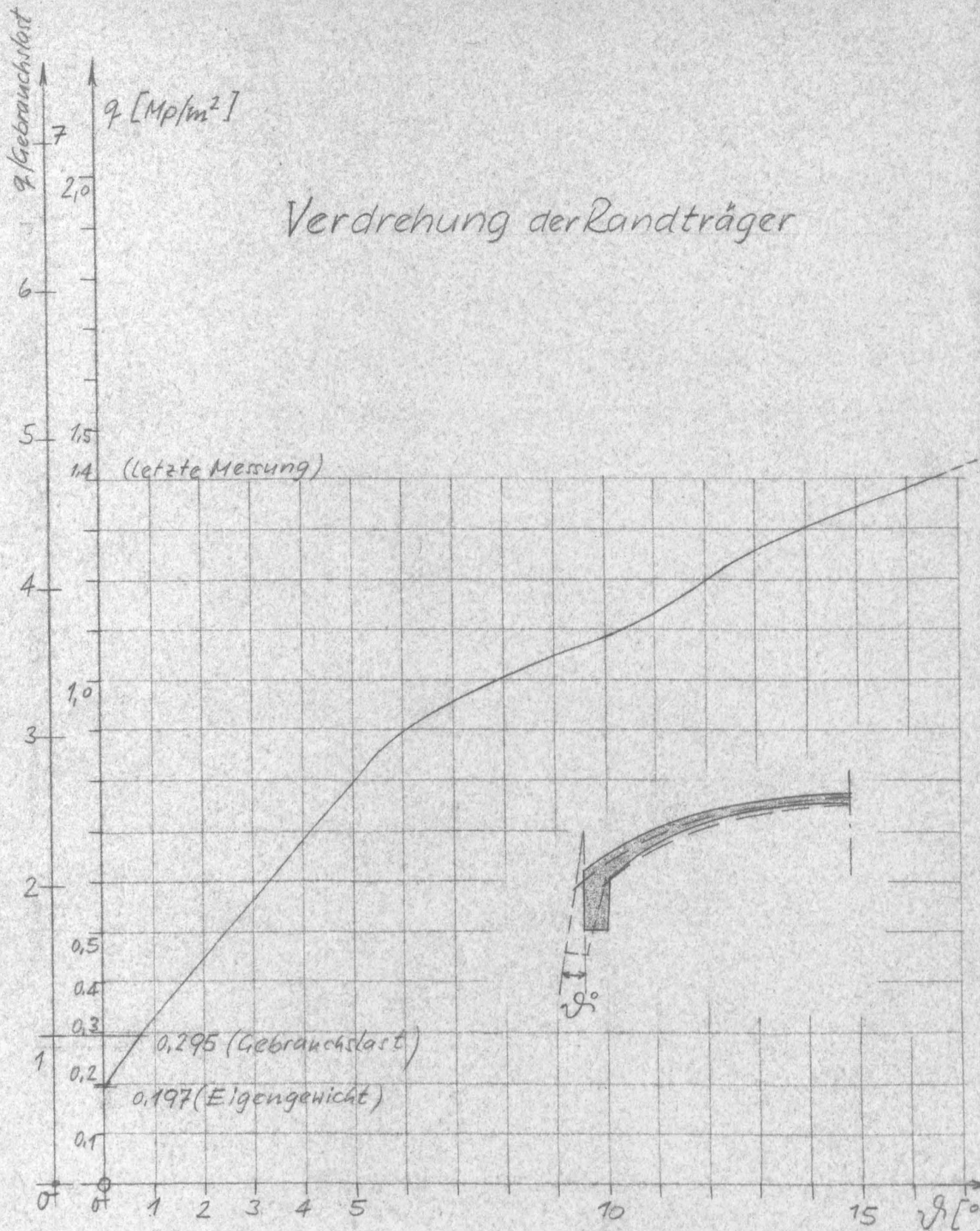


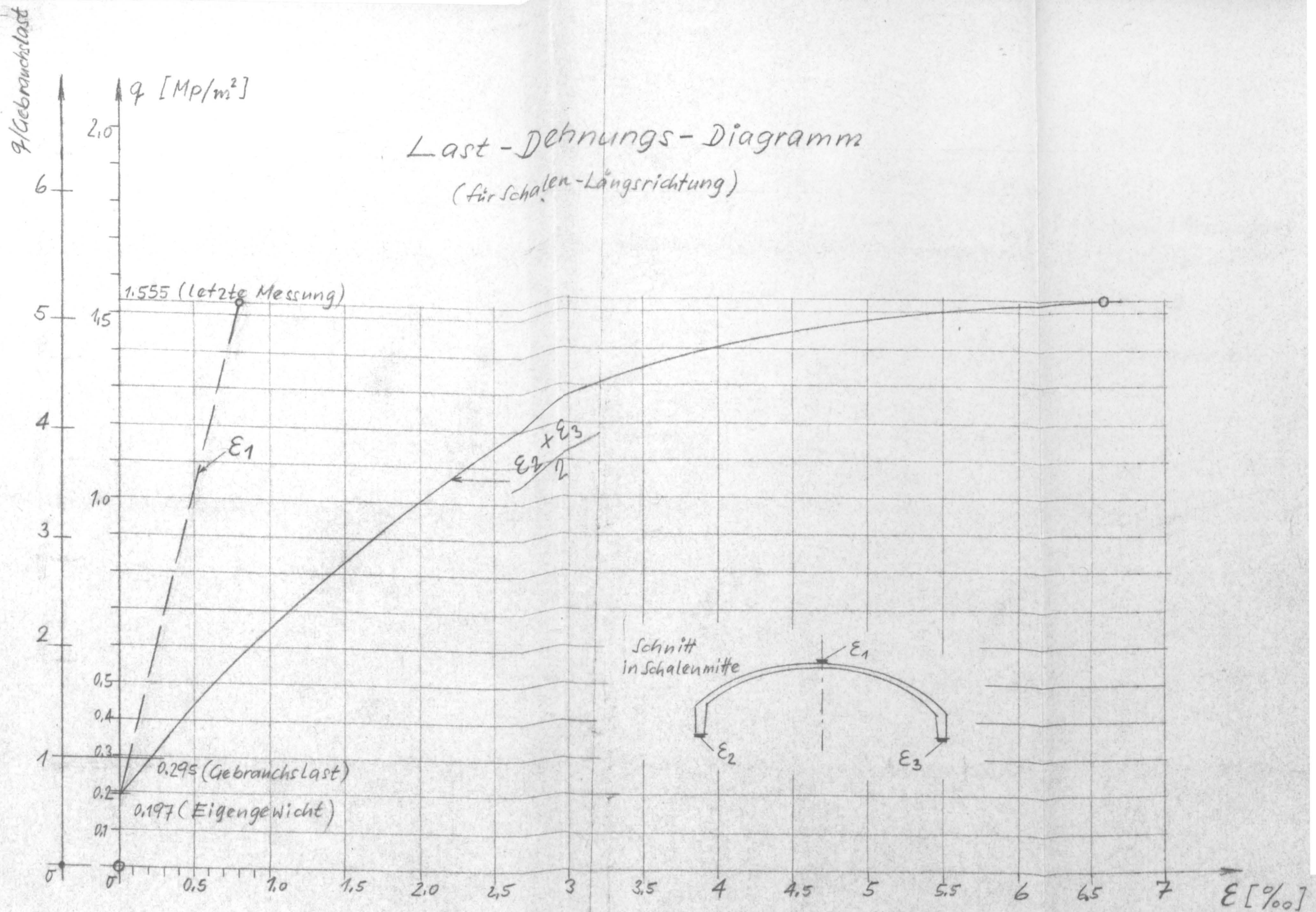




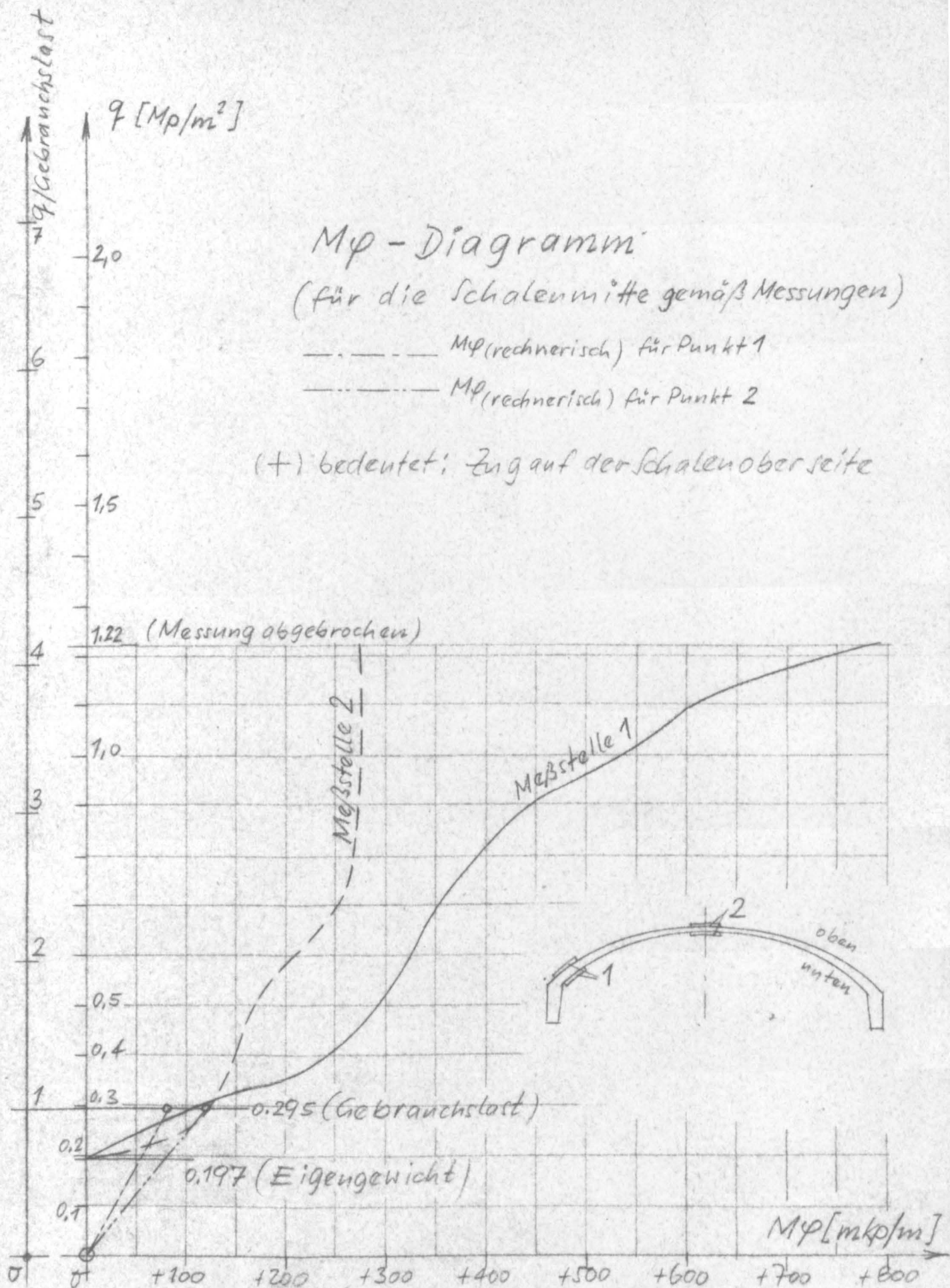


# Verdrehung der Randträger

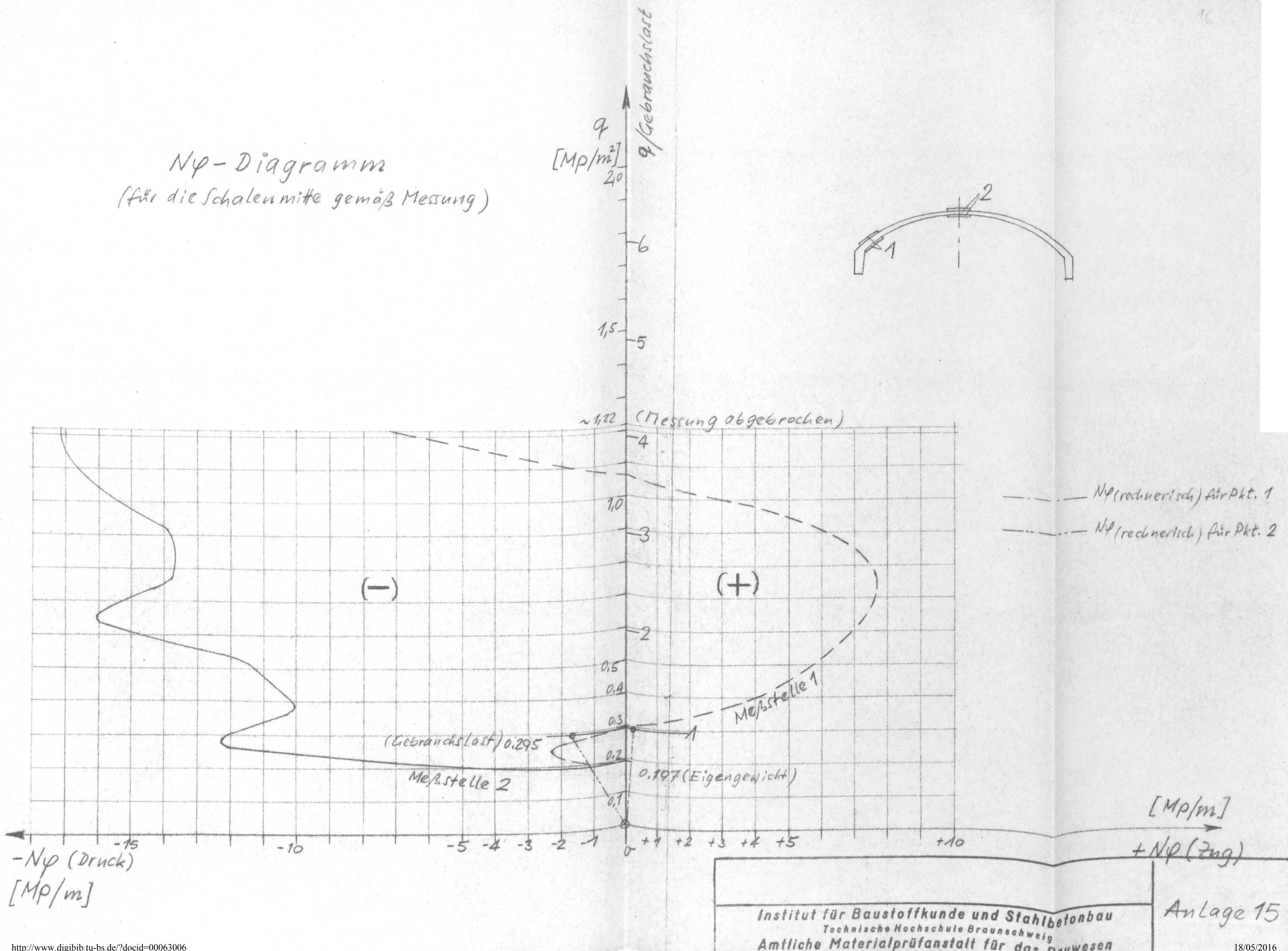








# *N $\varphi$ -Diagramm* *(für die Schalenmitte gemäß Messung)*

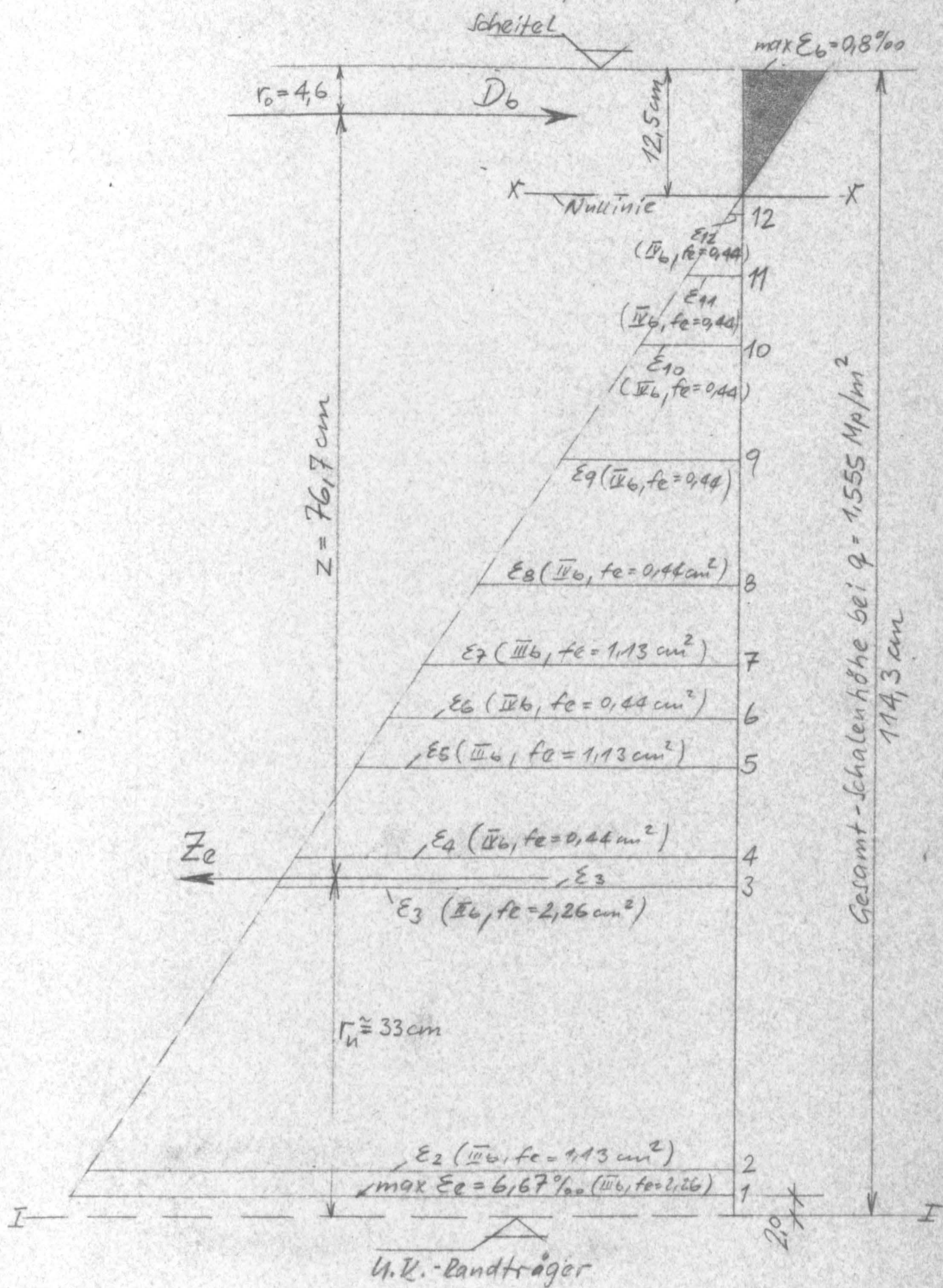




n-freie Schnittkraftermittlung für die  
Laststufe  $q = 1,555 \text{ Mp/m}^2$  Grundfläche  
(letzte Messung bei maximaler Pressekraft  
vor dem Zusammenbruch)

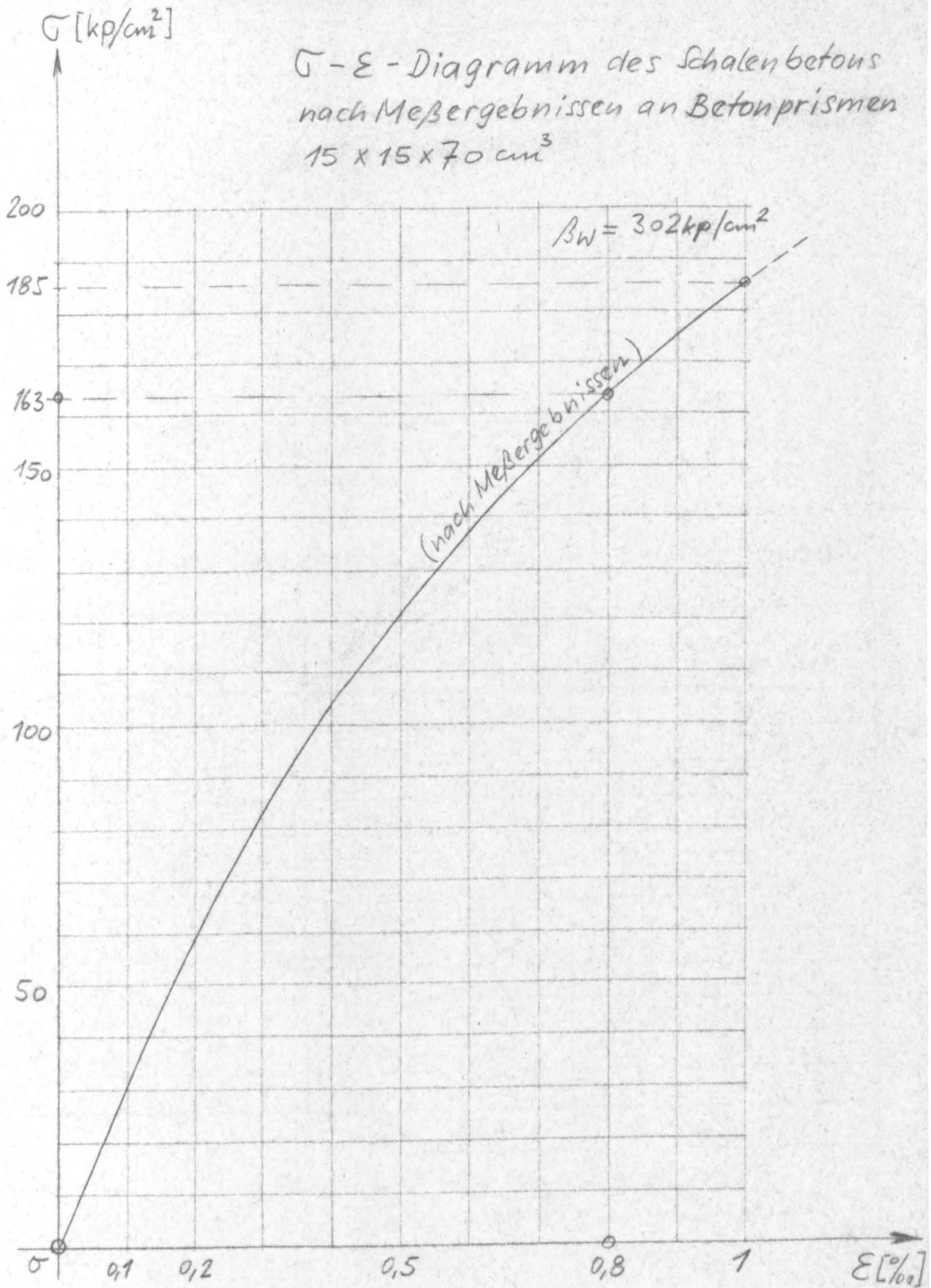
Seite I bis IV

Verteilung der  $\varepsilon$ -Werte über den  
Schalen-Querschnitt bei  $q = 1,555 \text{ Mp/m}^2$

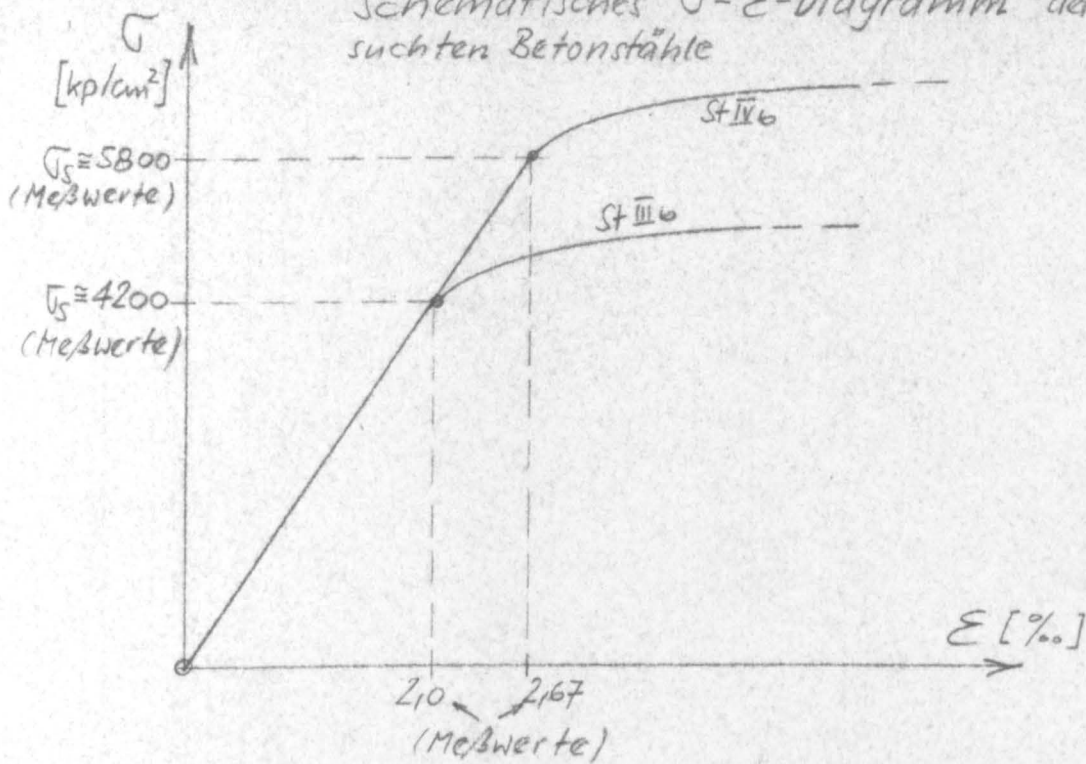


\*) Angaben über  $f_e$  gelten für  
den halben Schalen-Querschnitt.





Schematisches  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm der untersuchten Betonstähle -III-



Ermittlung der Zugkraft  $Z_e$  für  $q = 1,555 \text{ Mp/m}^2$

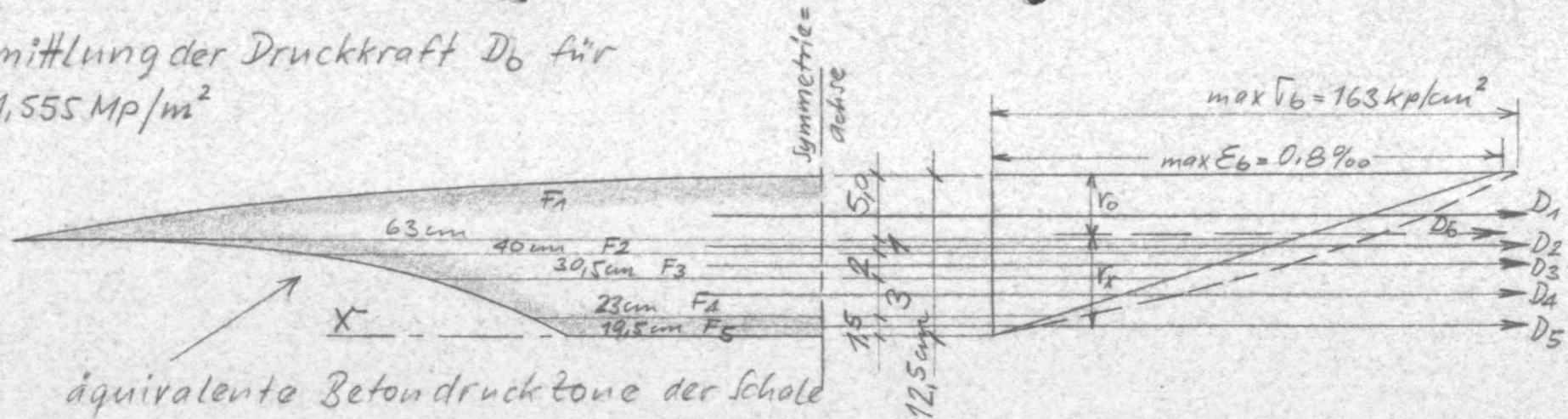
Nr.	$f_c$ ( $\text{cm}^2$ )	$\epsilon_e$ (‰)	Stahl- güte	$\sigma_e$ <sup>1)</sup> ( $\text{kp/cm}^2$ )	$Z_e = \sigma_e \cdot f_c$ (Mp)	$r_{I-I}$ (cm)	$Z \cdot r$ (Mp·cm)
1	2x2,26	6,67	IIIb	4200	19,00	2,0	38,0
2	2x1,13	6,5	"	4200	9,50	4,5	42,7
3	2x2,26	4,62	"	4200	19,00	32,5	617,5
4	2x0,44	4,42	IVb	5800	5,10	35,5	181,0
5	2x1,13	3,83	IIIb	4200	9,50	44,5	424,0
6	2x0,44	3,50	IVb	5800	5,10	49,3	252,5
7	2x1,13	3,15	IIIb	4200	9,50	54,6	519,5
8	2x0,44	2,62	IVb	5500	4,84	62,8	304,0
9	2x0,44	1,80	"	3780	3,32	75,3	250,0
10	2x0,44	1,00	"	2100	1,85	86,8	160,8
11	2x0,44	0,55	"	1150	1,01	93,7	94,4
12	2x0,44	0,13	"	270	0,24	100	24,1
$\Sigma =$					87,96	$\Sigma =$	2907,0

1) für  $\epsilon$ -Werte  $> 2,10$  (St IIIb) und  $2,67$  (St IVb) wird  $\sigma_e = \sigma_s$  in die Rechnung eingesetzt

$$r_u = \frac{2907,0}{87,96} = 33,05 \text{ cm}$$

$$Z_e = 87,96 \text{ Mp}$$

Ermittlung der Druckkraft  $D_b$  für  
 $q = 1,555 \text{ Mp/m}^2$



Nr.	$\epsilon_b$ (‰)	$\sigma_b$ (kp/cm <sup>2</sup> )	F (cm <sup>2</sup> )	$D_b = \sigma_b \cdot F$ (Mp)	$r_{x-x}$ (cm)	$D_b \cdot r$ (Mp·cm)
1	0,58	135	410	55,400	9,5	525,0
2	0,425	108	97	10,500	7,0	73,5
3	0,335	91	139	12,650	5,55	70,3
4	0,19	57	155	8,830	3,0	26,5
5	0,04	12	60	0,720	0,8	0,6
$\Sigma =$				88,100	$\Sigma =$	695,9

1)  $\sigma_b$  gemäß Seite II

$$r_x = \frac{695,9}{88,1} = 7,9 \text{ cm}$$

$$r_0 = 12,5 - 7,9 = 4,6 \text{ cm}$$

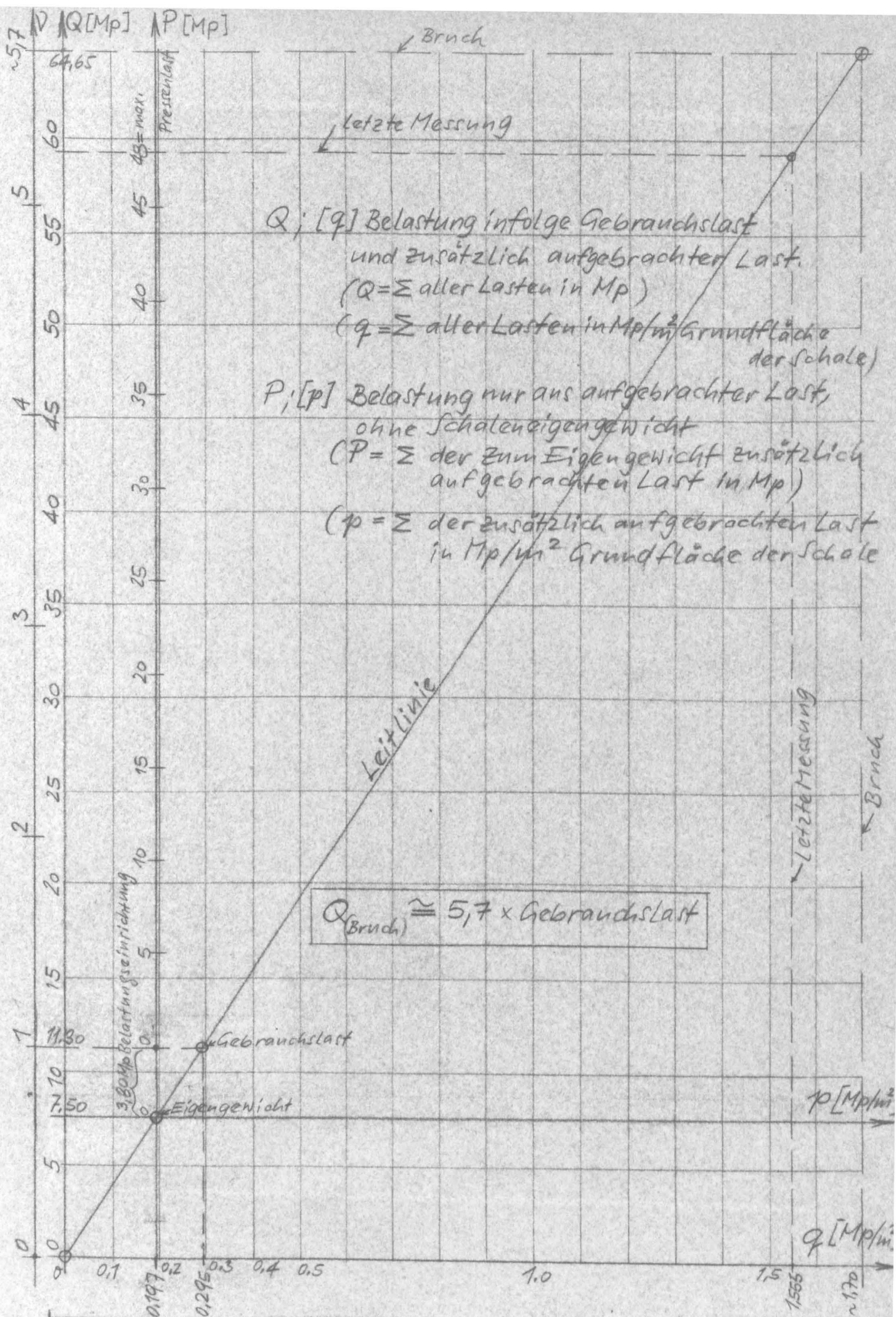
$$\underline{D_b} = 88,1 \text{ Mp} \approx \underline{Z_e} \approx 88,0 \text{ Mp}; \quad \underline{M_i} = D_b \cdot z \approx Z_e \cdot z \approx \underline{M_a}$$

$$\underline{M_i} \approx 88,1 \cdot 0,767 \approx 88,0 \cdot 0,767 \\ \approx 68,3 \text{ Mpm} \approx \underline{68,2 \text{ Mpm}}$$

$$\underline{M_a} = (g + p^* p) 4,41 \cdot \frac{0,88^2}{8} \\ = (0,197 + 0,111 + 1,26) \cdot 43,5 \\ = \underline{68,2 \text{ Mpm}}$$

$p^*$  = auslastverteilung = 0,111  
 $p$  = Pressenlast (Mpm/m<sup>2</sup>)









Institut  
für Baustoffkunde  
und Materialprüfung  
T. H. Braunschweig

Bild I

Anlage zum  
~~Prüfungszeugnis~~  
Bericht



Institut  
für Baustoffkunde  
und Materialprüfung  
T. H. Braunschweig

*Bild II*

Anlage zum  
~~Prüfungszeugnis~~  
Bericht

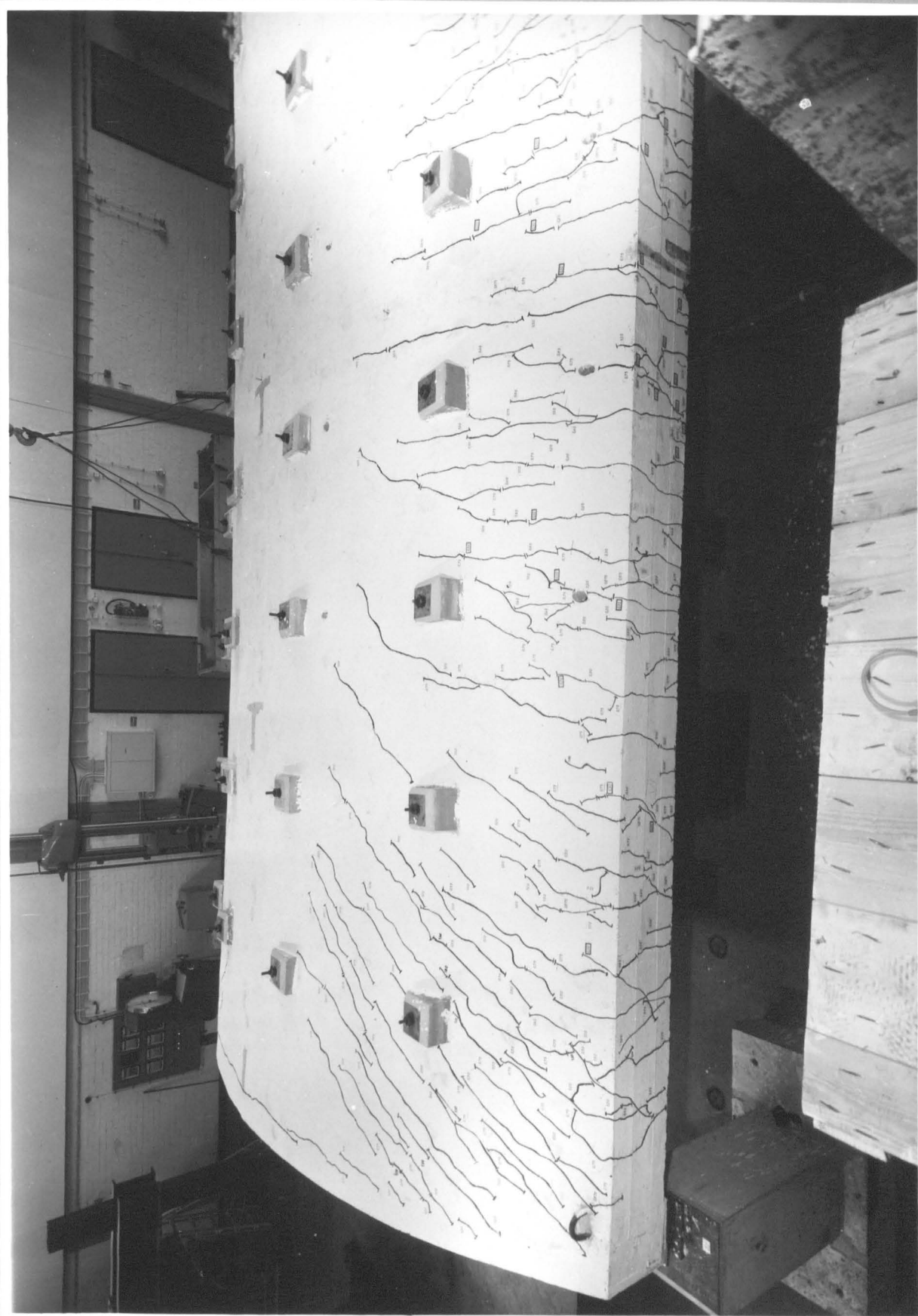


Institut  
für Baustoffkunde  
und Materialprüfung  
T. H. Braunschweig

Bild III

Anlage zum  
~~Prüfungszeugnis~~  
Bericht



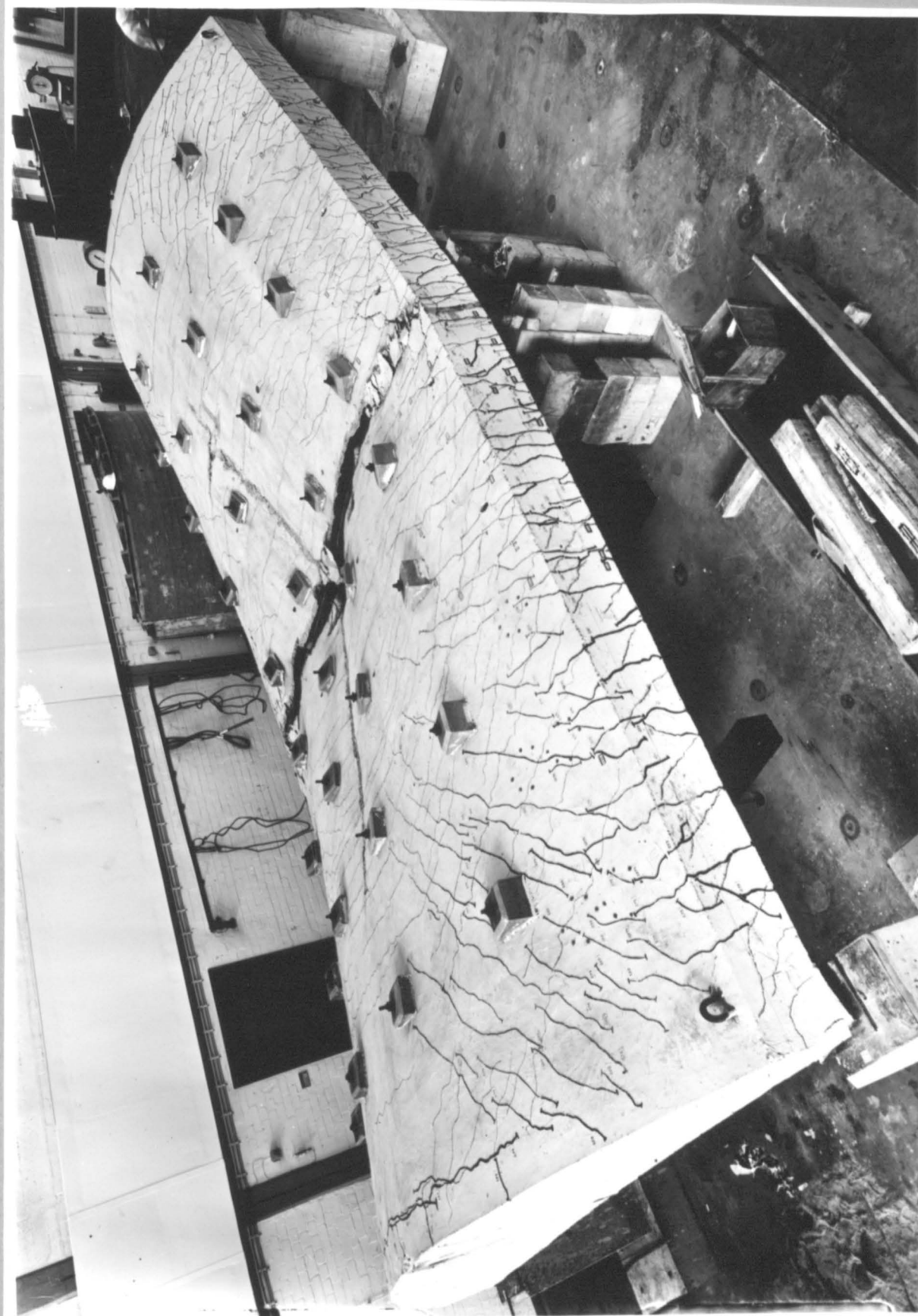


Institut  
für Baustoffkunde  
und Materialprüfung  
T. H. Braunschweig

*Bild IV*

Anlage zum  
~~Prüfungszeugnis~~

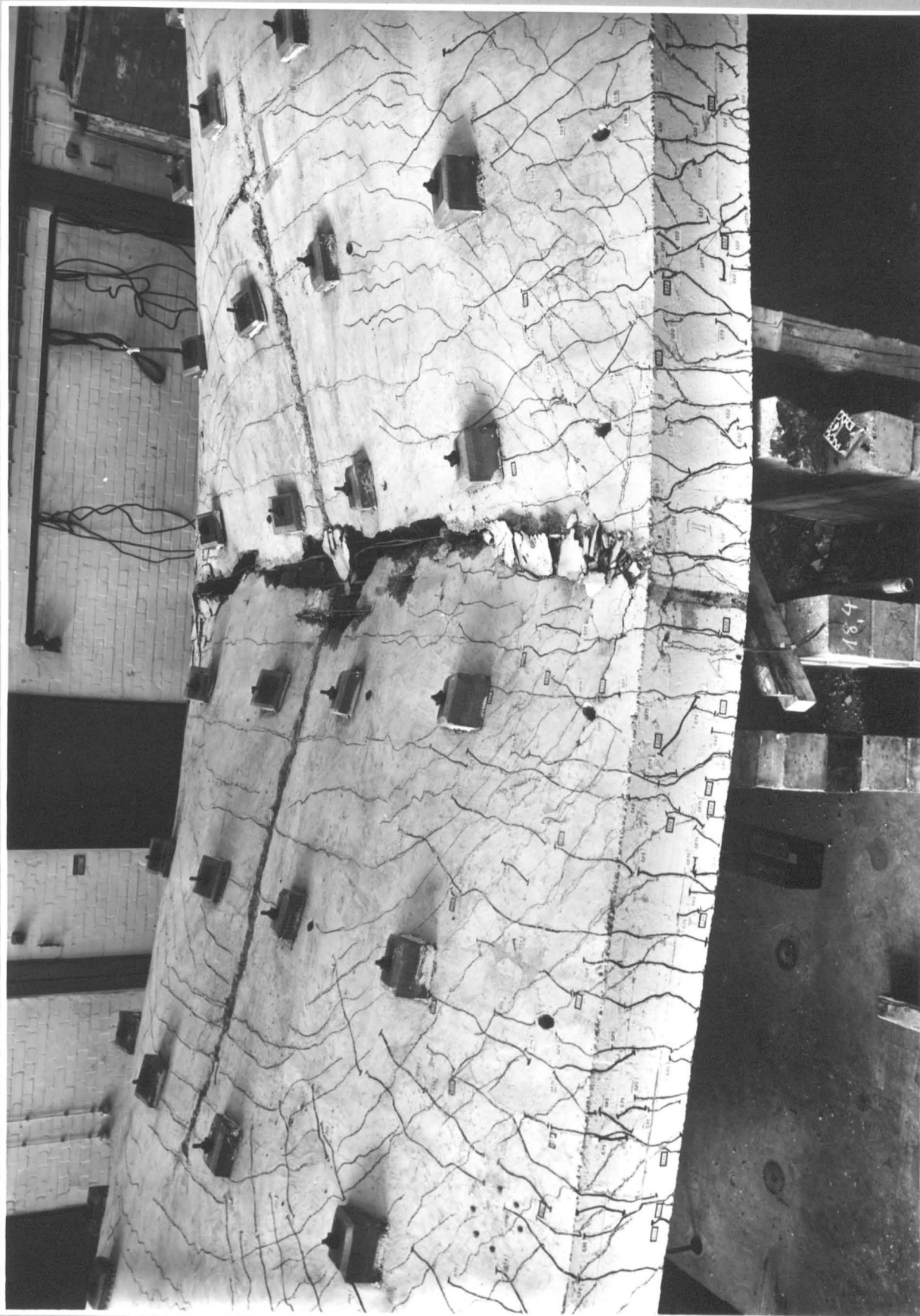




Institut  
für Baustoffkunde  
und Materialprüfung  
T. H. Braunschweig

Bild V

Anlage zum  
~~Prüfungszeugnis~~  
Bericht



Institut  
für Baustoffkunde  
und Materialprüfung  
T. H. Braunschweig

Bild VI

Anlage zum  
Prüfungszeugnis  
Bericht

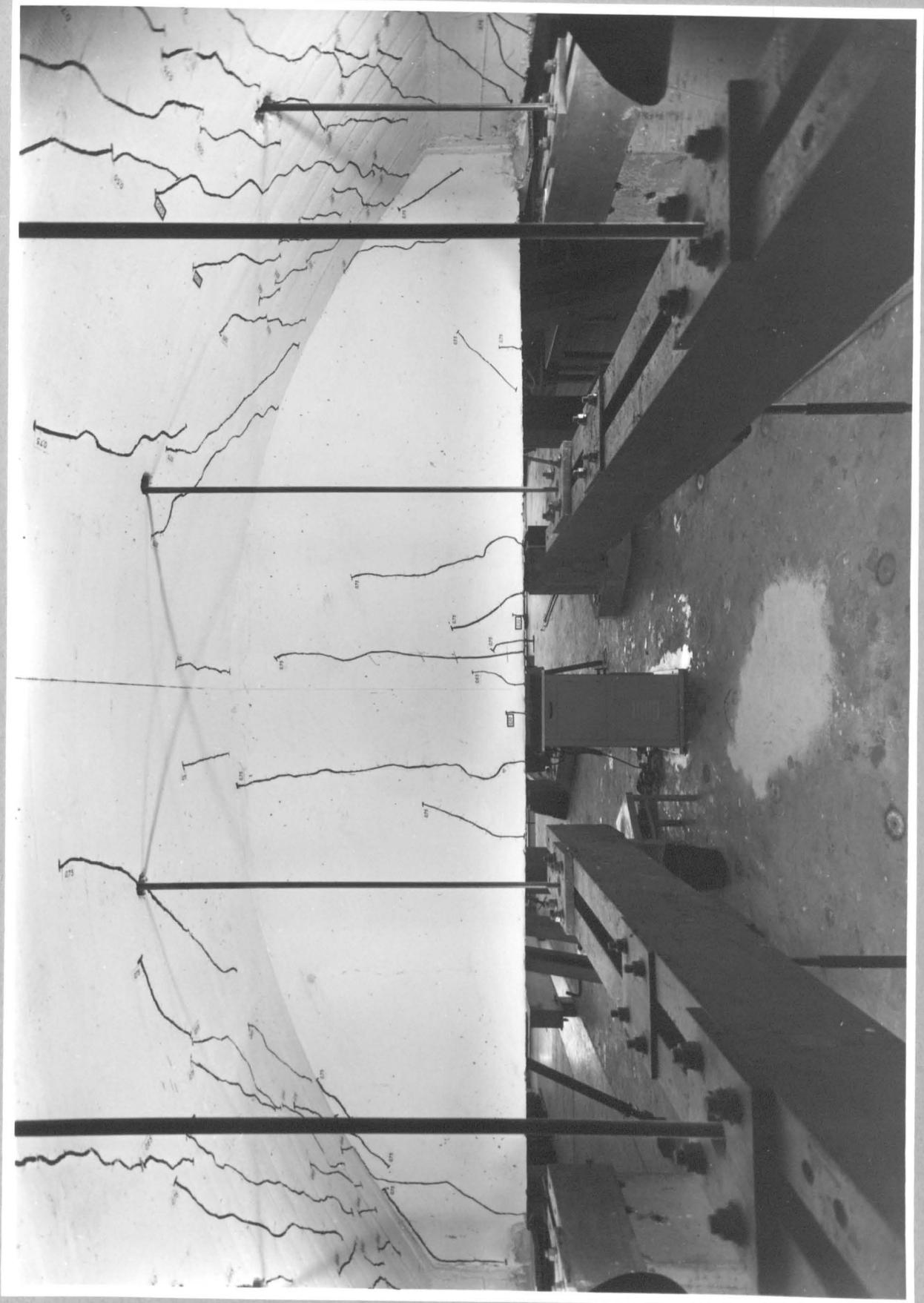


Institut  
für Baustoffkunde  
und Materialprüfung  
T. H. Braunschweig

Bild VII

Anlage zum  
Prüfungszeugnis  
Bericht





Institut  
für Baustoffkunde  
und Materialprüfung  
T. H. Braunschweig

Bild VIII

Anlage zum  
-Prüfungszeugnis-  
Bericht